



---

**Universidad de Valladolid**

Facultad de Ciencias

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Física

**Estudio de la isla urbana de calor**

*Autor: Ángel Paes Villar*

*Tutor/es: M<sup>a</sup> Ángeles García Pérez*

*Isidro A. Pérez Bartolomé*

# Índice

<b>Abstract</b> .....	<b>I</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>II</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Descripción de la isla urbana de calor</b> .....	<b>2</b>
1.1.1 Definición y observaciones .....	2
1.1.2 Procesos que originan la isla urbana de calor .....	3
1.1.3 Escala de las interacciones .....	4
1.1.4 Estructura de la isla urbana de calor y diferencia con la isla urbana de calor superficial .....	5
1.1.5 Método para el estudio de la isla urbana de calor .....	6
1.1.6 Relación entre el clima urbano y el cambio climático .....	10
<b>1.2. Descripción de la ciudad de Pekín</b> .....	<b>12</b>
1.2.1 Pekín.....	12
1.2.2 Clima .....	14
1.2.3 Desarrollo y estructura urbana .....	15
1.2.4 Zonas climáticas locales de Pekín (LCZ).....	17
<b>1.3 Objetivos</b> .....	<b>19</b>
<b>1.4 Estructura del trabajo</b> .....	<b>19</b>
<b>2. Descripción experimental</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 Material: MODIS</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2 Metodología</b> .....	<b>22</b>
2.2.1 Indicadores estadísticos.....	23
2.2.2 Tendencia de la temperatura .....	24
<b>3. Resultados</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1 Distribución espacial</b> .....	<b>27</b>
3.1.1 Temperatura media.....	27
3.1.2 Temperaturas máxima y mínima.....	32
3.1.3 Otros parámetros estadísticos.....	36
<b>3.2 Evolución temporal</b> .....	<b>37</b>
<b>4. Conclusiones</b> .....	<b>44</b>
<b>5. Bibliografía</b> .....	<b>46</b>
<b>6. Figuras, tablas y gráficos</b> .....	<b>52</b>

## **Abstract**

Surface temperatures are, in general, warmer in the urban areas than in the countryside. This phenomenon is known as the surface urban heat island (SUHI). In this study, SUHI in Beijing (China) is analyzed from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) observations during the period 2000–2021.

Results show that daytime SUHI is more intense in summer (3,0 °C) and non-existent in winter (0,0 °C). Nighttime SUHI is most significant in winter (4,0 °C) and the weakest takes place in summer (2,4 °C). Further, increments of 0,5 °C (daytime) and 0,8 °C (nighttime) per decade are estimated in suburban surface temperatures.

Keywords: urban heat island, Beijing, land surface temperature, MODIS.

## Resumen

Las temperaturas superficiales son, por lo general, más altas en las zonas urbanas que en las zonas rurales. Este fenómeno se conoce como la isla urbana de calor superficial (SUHI por sus siglas en inglés). En este estudio, se analiza la SUHI de la ciudad de Pekín (China) a partir de las observaciones de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) durante el periodo 2000–2021.

Los resultados muestran que la SUHI diurna es más intensa en los meses de verano ( $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e inexistente en los meses de invierno ( $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). La SUHI nocturna es significativa en los meses de invierno ( $4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), y la más débil tiene lugar en los de verano ( $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Además, se estima un crecimiento de las temperaturas superficiales suburbanas de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (durante el día) y de  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (durante la noche) por década.

Palabras clave: isla urbana de calor, Pekín, temperatura superficial, MODIS.

---

# 1. Introducción

## 1.1 Descripción de la isla urbana de calor

### 1.1.1 Definición y observaciones

Desde que se acuñó por primera vez el concepto de *isla urbana de calor*, *urban heat island* en inglés (UHI)<sup>1</sup>, el estudio del clima urbano se ha desarrollado muy rápidamente<sup>2</sup>: de una decena de estudios publicados antes de 1990; pasando por alrededor de 30 estudios por año entre 1990 y 2000, ya han visto la luz más de 1800 artículos. EE. UU. y China son los países líderes en publicaciones sobre la isla urbana de calor. Tantos estudios se han visto motivados por dos de los problemas más importantes del siglo XXI<sup>3</sup>: el crecimiento de la población y el cambio climático. Las grandes ciudades juegan un papel importante en el desarrollo de estos dos temas de gran actualidad: por un lado, la expansión urbana está motivada por el crecimiento poblacional –hoy por hoy, el 55% de las personas viven en ciudades<sup>4</sup>–; por otro lado, los modelos climáticos regionales han empezado a considerar las contribuciones de las ciudades en sus simulaciones climáticas con el fin de hallar indicios que relacionen el clima de las ciudades y el cambio climático<sup>5</sup>. En un primer lugar, examinaremos con detalle el clima de las ciudades.

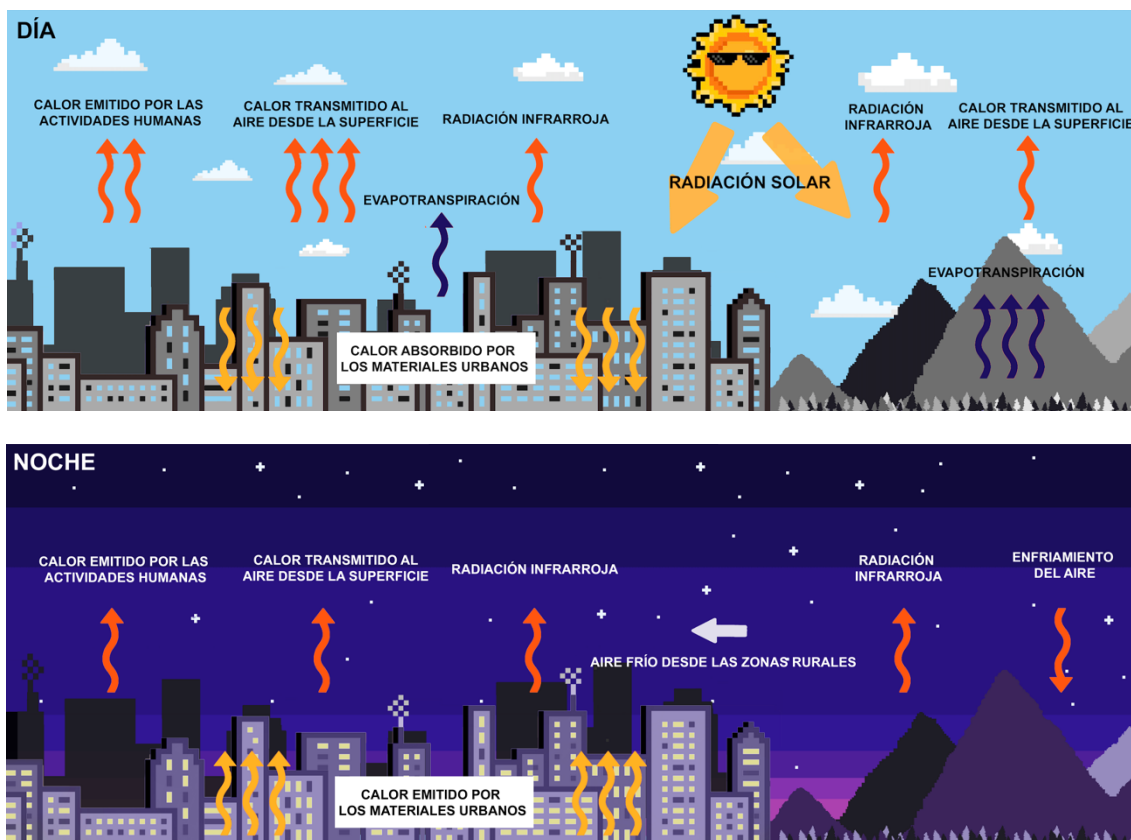
Las grandes ciudades influyen localmente en el tiempo atmosférico, llegando a modificar el clima de la zona. De hecho, se observan diferencias en las temperaturas, vientos y precipitaciones con respecto a las de las zonas rurales<sup>5</sup>:

- Temperaturas: por lo general, el aire en las ciudades es más cálido que en las zonas rurales, especialmente de noche y en condiciones de altas presiones. Esto es lo que se conoce como la isla urbana de calor. Las temperaturas superficiales también son, por lo común, más altas que en el campo, con la excepción de ciudades en climas desérticos. Estas superficies con mayor temperatura crean la llamada isla urbana de calor superficial, en inglés *surface urban heat island* (SUHI), la cual no ha de confundirse con la UHI. Más adelante, las diferenciaremos en más profundidad.
- Vientos: las ciudades actúan como escudos ante vientos moderados o fuertes debido a su estructura tridimensional. Además, pueden convertirse en áreas de convergencia y divergencia que resultan en un movimiento del aire en vertical, formándose grandes *penachos* urbanos. En condiciones de viento suave, la UHI induce un flujo de aire desde la zona rural hasta el centro de la ciudad, similar a la brisa marina o a la brisa de tierra. Este viento también puede hacer recircular las partículas contaminantes en suspensión.
- Precipitaciones y nubes<sup>6</sup>: la alteración en el flujo de los vientos y las circulaciones inducidas por el casco urbano dan lugar a movimientos verticales que pueden desarrollar nubes y precipitaciones. Este tipo de eventos está particularmente asociado a las lluvias de convección de la época estival. Por otro lado, flujos de aire convergente pueden llegar a formar grandes cúmulos de nubes, disminuyendo la radiación solar especialmente en verano<sup>7,8</sup>.

Además, el clima urbano influye indirectamente en la calidad del aire de las ciudades, llegándose a formar grandes *nubes* de contaminación y suponiendo un claro riesgo para la salud de sus habitantes<sup>9,10</sup>.

### 1.1.2 Procesos que originan la isla urbana de calor

A pesar de que las grandes ciudades sean sistemas muy complejos de modelar debido a la heterogeneidad de sus edificios, calles y otro mobiliario urbano, son bien conocidas las causas que originan la isla urbana de calor. La UHI aparece principalmente por la *artificialización* –urbanización– de la superficie<sup>11</sup>. Durante las horas del día, más de la mitad de la radiación solar queda almacenada en los materiales que componen el ecosistema urbano (asfalto, pavimento, ladrillo, piedra, etc.). Por la noche, todo este calor acumulado se libera a la atmósfera, limitando el enfriamiento del aire. Esta es la razón por la que las ciudades tienen una temperatura más alta que sus áreas colindantes, especialmente después de la puesta de sol y en horario nocturno. Existen, además, otros factores que potencian la magnitud de la UHI y que veremos a continuación (**Figura 1**).



**Figura 1.** Principales procesos que intervienen en la formación de la isla urbana de calor (UHI). La urbanización de la superficie, la ausencia de zonas verdes y, en menor medida, las actividades antropogénicas, modifican significativamente los intercambios de energía. Durante el día, la mayor parte de la radiación solar se almacena en los materiales urbanos; este calor se libera durante la noche, limitando el enfriamiento del aire de las ciudades. De esta manera, se crea la isla urbana de calor. Fuente: elaboración propia.

Uno de estos factores es la distribución tridimensional de las ciudades. La estructura tridimensional favorece la acumulación de calor, ya que incrementa la superficie que está en contacto con la atmósfera. Las construcciones urbanas dan lugar a unas superficies impermeables carentes de zonas verdes que contrastan con las superficies con cubierta vegetal de las zonas rurales. La ausencia de *evapotranspiración* –combinación entre la evaporación y transpiración de agua de una superficie– y la escasa ventilación resultan determinantes para el calentamiento de las superficies urbanas<sup>9</sup>. Curiosamente, debido a las sombras proyectadas por los edificios durante las primeras horas de la mañana, es

posible observar las *islas urbanas de frío*, cuando las áreas rurales elevan su temperatura más rápidamente que la ciudad.

Por otro lado, podríamos pensar que el albedo de las superficies urbanas juega un papel fundamental en la creación de UHI. Sin embargo, tal como se señalan Oke & Voogt<sup>11</sup>, las diferencias de albedo entre las superficies de la ciudad y del campo no son tan elevadas. Es cierto que algunas superficies urbanas pueden llegar a tener un albedo significativo (fachadas con colores claros, cristales), pero la radiación reflejada acaba por absorberse en otros elementos de la ciudad. La ausencia de una cubierta vegetal que limite la acción directa del sol potencia esta absorción de energía. Será este calor almacenado el que amortigüe el enfriamiento del aire en la ciudad por las noches.

El papel de las actividades humanas también tiene su efecto en la creación de la UHI mediante la emisión directa de calor a la atmósfera de la ciudad: la calefacción del hogar<sup>12</sup>, el aire acondicionado<sup>13</sup>, y en menor medida, el tráfico.

Por último, la presencia de partículas contaminantes en el aire no contribuye al aumento de las temperaturas urbanas. Es más, se ha comprobado que en ciudades cuyo aire está extremadamente contaminado, como en el caso de Delhi, las partículas en suspensión limitan la exposición solar de la superficie, produciendo incluso un efecto de disminución de las temperaturas<sup>14</sup>.

### 1.1.3 Escala de las interacciones

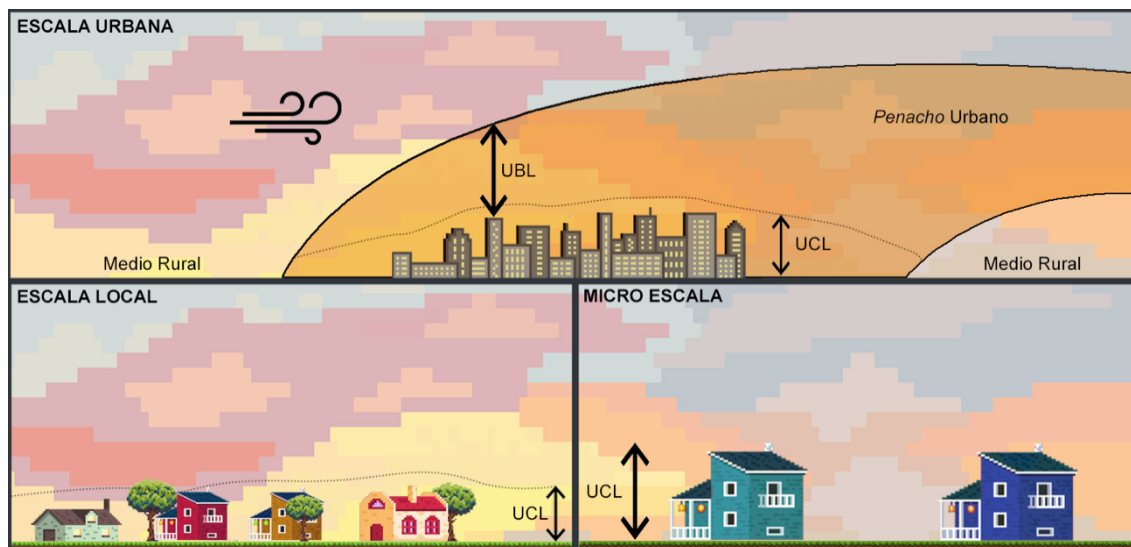
En la ciudad, es importante distinguir los procesos meteorológicos en función de la escala o el tamaño del área en que se produzcan<sup>15</sup>:

- Microescala ( $\leq 10^2$  m): se producen procesos *micrometeorológicos* que se ven afectados fuertemente por los elementos de la zona (árboles, edificios, carreteras, calles, jardines y actividades humanas). Durante el día, los edificios absorben la radiación solar y, junto con los árboles, proyectan sombras sobre las superficies urbanas. Durante la noche, emiten el calor almacenado durante el día. Además, las formas espaciales de las calles influyen en el flujo del viento. Una estación meteorológica puede dar cuenta de todos estos procesos atmosféricos.
- Escala local o distrito ( $10^2$ – $10^4$  m): en esta escala, el clima urbano es más sensible a pequeños elementos orográficos, el tipo de terreno, las formas urbanas y la presencia de zonas verdes. De nuevo, una estación meteorológica es suficiente para tomar medidas representativas de la zona.
- Escala urbana ( $10^4$ – $10^5$  m): tanto la microescala como la escala local dependen del clima de la ciudad en su conjunto, así como de la evolución de su UHI y de la forma y tamaño de la metrópoli. Debido al gran tamaño del área metropolitana, las medidas de estaciones meteorológicas individuales no son representativas del conjunto total. A escala urbana, los fenómenos meteorológicos y la orografía de la zona determinan notablemente el clima urbano. La lluvia o los fuertes vientos reducen la magnitud de la UHI. Las ciudades costeras suelen ser más frías que las ciudades de interior durante el día, siendo contraria la situación durante la noche<sup>16</sup>. En cuanto a las ciudades montañosas, como en Stuttgart (Alemania), las colinas circundantes inducen el estancamiento del aire en la ciudad, amplificando el



efecto de la UHI<sup>17</sup>; en otras ciudades, el descenso nocturno de aire más frío desde lo alto de la montaña hacia la ciudad mitiga el calor acumulado durante el día<sup>18</sup>.

- Mesoescala ( $10^5$ – $10^6$  m): comprende desde las zonas urbanas hasta las rurales. A esta escala se dan fenómenos como la formación de tormentas, reventones – descensos bruscos de aire de una nube de tormenta, seguido de un desplazamiento sobre el suelo– o brisa marina.



**Figura 2.** Distintas escalas de interacción de los procesos meteorológicos urbanos. Además, se señala la extensión de la *urban canopy layer* (UCL) y de la *urban boundary layer* (UBL). El *penacho urbano* queda a merced de los vientos sinópticos. Fuente: elaboración propia.

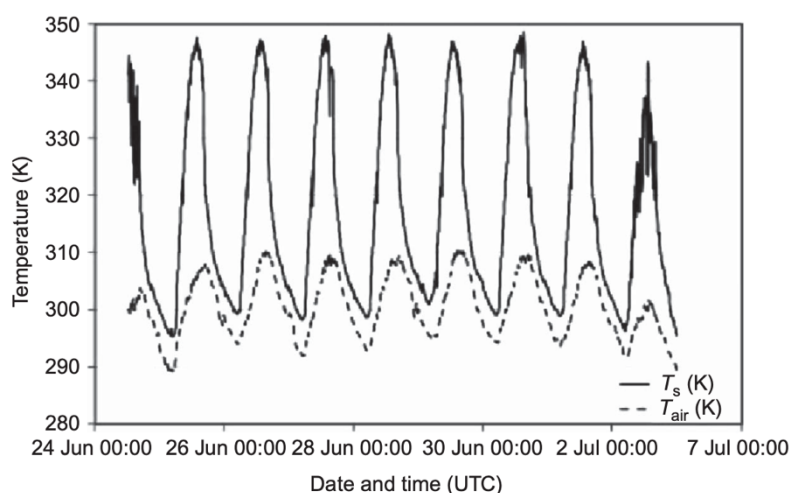
#### 1.1.4 Estructura de la isla urbana de calor y diferencia con la isla urbana de calor superficial

Se pueden definir diferentes capas atmosféricas en una isla de calor<sup>19</sup>: la capa de aire comprendida entre la superficie y aproximadamente la altura media de los edificios que forman el núcleo urbano se denomina, en inglés, *urban canopy layer* (UCL); mientras que a la capa directamente superior, por encima de los tejados de los edificios, se la conoce como *urban boundary layer* (UBL) (**Figura 2**). Ambas capas también se distinguen por su modo de estudio. La UCL, por lo común, se estudia mediante estaciones meteorológicas fijas o gracias a sensores montados en vehículos; las observaciones de la UBL se realizan desde plataformas especializadas, como pueden ser torres de elevada altitud, globos meteorológicos u otros sensores acoplados a instrumentos voladores<sup>20,21</sup>. Los datos recopilados por estas medidas *in situ* necesitan de protección frente a la radiación de tal manera que puedan ser representativos para el estudio de la atmósfera urbana. Asimismo, este tipo de medidas proporciona una información veraz para la cuantificación de la UHI ya que obtiene información de las variables atmosféricas mediante observaciones directas. No obstante, debido al limitado número de estaciones meteorológicas, la distribución espacial de la UHI puede resultar poco detallada por no tener una adecuada resolución en la medida. La escasa resolución de la UHI a partir de medidas *in situ* puede suponer una dificultad a la hora de tratar temas como el cambio climático o futuros diseños urbanísticos<sup>22,23</sup>. Sin embargo, con el objetivo de mejorar la

resolución y aumentar el detalle de la isla urbana de calor, se han desarrollado métodos alternativos de medición a través de sensores térmicos, como veremos a continuación.

La diferencia de temperaturas de la ciudad con respecto a las zonas rurales no solo queda patente en la atmósfera, sino que también existe un contraste térmico entre la superficie urbana y la rural, que constituye la SUHI. Un análisis reciente<sup>24</sup> señala que el número de artículos basados en el descripción de la SUHI ha crecido notablemente en los últimos años, siendo las ciudades chinas los principales objetos de estudio. Además, señala que el 78% de las publicaciones ha usado los sensores térmicos de los satélites *Terra/Aqua (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: MODIS)* y *Landsat*. La recopilación de datos de la SUHI proporciona información sólida que ofrece la posibilidad de estudiar el entorno urbano a escala espacial (de escala local a global) y temporal (diaria, estacional y anual)<sup>25,26</sup>. También puede usarse para predecir la intensidad y el tamaño de la UHI<sup>27-29</sup>, aunque no es fácil encontrar una relación simple y general entre la UHI y la SUHI y las relaciones halladas muestran un comportamiento muy particular para cada ciudad<sup>20</sup>.

Es muy común que la UHI alcance su máxima intensidad durante las noches – debido a la emisión del calor acumulado durante las horas de sol por los materiales urbanos–, mientras que la SUHI lo hace durante el día<sup>30</sup> (**Figura 3**). Los contrastes entre la SUHI y la UHI, así como la diferencia temporal de sus máximos, se deben principalmente a las características de las superficies rural y urbana (albedo, permeabilidad, emisividad, absorción térmica, entre otras), además de la estación del año, geografía y las condiciones meteorológicas reinantes<sup>20,31</sup>.



**Figura 3.** Comparación entre la temperatura atmosférica ( $T_{air}(K)$ ) y la temperatura superficial ( $T_s(K)$ ) de una estación meteorológica fija en la ciudad de Madrid en el año 2008. Fuente: Sobrino et al. (2013)<sup>32</sup>.

### 1.1.5 Método para el estudio de la isla urbana de calor

El estudio del clima urbano necesita un enfoque multidisciplinar que describa adecuadamente la ciudad y sus alrededores. Se requiere, por tanto, a) homogeneizar las superficies por su tipo y uso; b) parametrizar la morfología de edificios y calles; c) recabar información acerca de la arquitectura de las construcciones; d) cuantificar la extensión de la cubierta vegetal urbana y, por último, e) tener en cuenta las posibles influencias antropogénicas y/o socioeconómicas<sup>33</sup>. Es importante destacar que los parámetros que

describan el paisaje urbano dependen en gran medida de la escala en la que se trabaje. Así, en la mesoescala, basta con una primera aproximación para describir calzadas, pavimento o zonas verdes. No obstante, en modelos de escala local o microescala, se hace necesario un inventario más minucioso que dé cuenta de las características propias de la zona: forma de las fachadas de los edificios, especie y tamaño de los árboles, etc. Existen modelos urbanos a escala local, como el *Parallelized Large-eddy Simulation Model for urban applications* (PALM-4U), capaces de describir con precisiones de hasta 1 m los detalles de la ciudad<sup>34</sup>. Este nivel de meticulosidad en las descripciones requiere una obtención y un análisis de datos muy riguroso<sup>35</sup>: obtener datos que parametren toda esta información puede llegar a resultar una tarea muy compleja en términos de tiempo o dinero invertido. Para solucionar este problema, se han propuesto métodos que intentan homogeneizar y clasificar estas variables para la investigación del clima urbano.

a) *Homogeneización del suelo:*

Con el objetivo de poder cuantificar la UHI y comparar resultados entre diferentes ciudades, Stewart & Oke<sup>3</sup> propusieron una clasificación universal de los suelos urbano y rural basada en el uso, tipo y material de superficie y en la actividad humana que se desarrolla en ellos: las denominadas zonas locales climáticas, *local climate zones* en inglés (LCZ) (**Tabla 1**). Incluyen hasta 10 clases según la altura y densidad de las construcciones (1–10), y otras 7 para definir el tipo de superficie del suelo (A–G). Además, consideran ciertas particularidades en las superficies (b, s, d, w) que dependen significativamente del tiempo atmosférico, como las precipitaciones, o de los ciclos estacionales. Con el fin de ser aún más descriptivos, estas zonas climáticas pueden combinarse y dar lugar a subclases.

El principal objetivo de esta clasificación en LCZ se fundamenta en que zonas semejantes contribuyen de igual manera a la UHI. Se ha podido comprobar que esta clasificación es efectiva<sup>36–38</sup>. Existe un portal internacional, *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT)<sup>39</sup>, que recoge las LCZ de cualquier gran urbe del mundo. Asimismo, se han desarrollado métodos para reproducir con gran resolución las LCZ (hasta 100 m) a partir de imágenes satelitales<sup>40</sup>, otros que realizan inventarios de edificios y calles individuales para crear una base de datos aún más minuciosa<sup>41</sup> e, incluso, otras técnicas que extraen información directamente de Google Maps' Street View<sup>42</sup>. Por último, también existen iniciativas como la OSM ([www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)) abiertas a voluntarios o a agencias de cartografía que puedan recopilar información acerca de las calles de las ciudades.

b) *Parámetros morfológicos:*

Estos parámetros ayudan a describir la distribución y las características de la estructura tridimensional de las ciudades. Esta estructura favorece el almacenamiento de calor con la absorción de energía solar tras las múltiples reflexiones entre las superficies de los edificios. Algunos parámetros para tener en cuenta son la fracción de edificación –razón entre la superficie ocupada entre los edificios y la superficie horizontal del área en consideración–, fracción de permeabilidad –ídem para superficies permeables e impermeables–, densidad de muros –razón entre las superficies en contacto






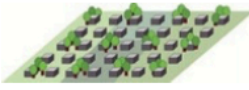
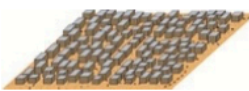



con la atmósfera y la superficie horizontal urbana— y media y desviación estándar de la altura de los edificios. Los valores de estos parámetros se pueden obtener mediante sensores remotos<sup>43</sup>, fotografías aéreas o satelitales<sup>44</sup>, sensores LiDAR<sup>45</sup> o mediante bases de datos abiertas como OSM<sup>46</sup>.

c) *Parámetros arquitectónicos:*

Los materiales de construcción, el tipo de tejado y la forma de los edificios modifican la conducción de calor y el intercambio energético con la atmósfera. Por ejemplo, la arquitectura tradicional de muchos pueblos mediterráneos se basa en el color blanco de sus muros y tejados, que reflejan la radiación solar<sup>47</sup>. Algunos de los parámetros arquitectónicos más importantes son el albedo de muros y tejados, la conductividad térmica y capacidad calorífica de superficies y la fracción de ventanas en las fachadas, entre otros. Sin embargo, una información tan detallada del paisaje urbano está muy limitada y solo es posible a escala local, por lo que se hacen imprescindibles las aproximaciones. En particular, es posible una clasificación de edificios a través de unas características arquitectónicas comunes, y relacionar así las propiedades térmicas y radiativas en función del tipo de construcción<sup>48</sup>. Para caracterizar la forma de los edificios, identificar los materiales de construcción y enumerar la cantidad de ventanas presentes se utilizan técnicas fotográficas<sup>49</sup>. De hecho, debido a la facilidad de la técnica toman especial relevancia las bases de datos abiertas como WUDAPT<sup>50</sup>.

d) *Cubierta vegetal:*

La densidad de espacios naturales varía notablemente incluso dentro de una misma ciudad<sup>51</sup>. Asimismo, existe una gran diversidad de escenarios vegetales (parques, zonas de césped, jardines, árboles urbanos, muros vegetales, etc.) y de especies de plantas cuyas características fisiológicas varían cíclicamente a lo largo del año. La presencia de vegetación provoca cambios en los climas urbanos debido a su capacidad de retención de humedad a través de la evapotranspiración. Además, las cubiertas vegetales proyectan sombras sobre las superficies de la ciudad y alteran el balance energético, disminuyendo la radiación solar absorbida por los materiales urbanos. Algunas de las variables a parametrizar en los modelos son las siguientes: proporción de superficie vegetal frente al área urbana considerada; fisiología y especie de las plantas, que determinan el área de la hoja, su albedo o su emisividad, y la altura o el tamaño de la copa de los árboles. Al igual que ocurre con los parámetros arquitectónicos, debido a la complejidad de los sistemas vegetales, solo es posible su caracterización a escalas locales. Sin embargo, cierta información acerca de los árboles urbanos puede encontrarse en los catastros municipales o en portales abiertos como *Treepedia* (<http://senseable.mit.edu/treepedia>) o el programa *Copernicus Urban Atlas* (<https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/street-tree-layer-stl>), que ofrece datos sobre la superficie arbórea de algunas ciudades europeas.

Built types	Definition	Land cover types	Definition
<p>1. Compact high-rise</p> 	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
<p>2. Compact midrise</p> 	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	B. Scattered trees	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
<p>3. Compact low-rise</p> 	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	C. Bush, scrub	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
<p>4. Open high-rise</p> 	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	D. Low plants	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
<p>5. Open midrise</p> 	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	E. Bare rock or paved	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
<p>6. Open low-rise</p> 	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	F. Bare soil or sand	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
<p>7. Lightweight low-rise</p> 	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	G. Water	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
<p>8. Large low-rise</p> 	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	<b>VARIABLE LAND COVER PROPERTIES</b>	
<p>9. Sparsely built</p> 	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	<i>b. bare trees</i>	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
<p>10. Heavy industry</p> 	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	<i>s. snow cover</i>	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		<i>d. dry ground</i>	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		<i>w. wet ground</i>	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

**Tabla 1.** Clasificación propuesta por Stewart & Oke de las zonas climáticas locales (LCZ). En ella se especifica el tipo de LCZ con su definición y un pequeño dibujo. Fuente: Stewart & Oke (2004)<sup>3</sup>.

e) *Datos socioeconómicos:*

El calor generado por la combustión en automóviles, grandes industrias y centrales térmicas, contribuye a la formación de la UHI. Las emisiones de calor de las dos últimas se pueden cuantificar vía inventarios. Además, el tráfico hace aumentar la temperatura de las calzadas y modifica los intercambios energéticos<sup>52</sup>. Parámetros como la densidad de vehículos o su velocidad media se hacen necesarios para construir modelos de clima urbano. Por otro lado, la calefacción y el aire acondicionado utilizados en los edificios suponen otro flujo importante de calor hacia la atmósfera. Schoettet et al.<sup>53</sup> presenta una serie de parámetros que relacionan el servicio de los edificios y su ocupación. Entre ellos está la densidad de población, la fracción del edificio en uso, horarios de ocupación, gasto energético, tipo de calefacción o presencia de aire acondicionado, con sus horarios de su funcionamiento (día o noche). En cuanto a las estrategias para la cuantificación de información, se suelen utilizar diversos métodos. Algunos métodos se basan en la recopilación de datos a partir de inventarios o registros tanto locales como estatales (p. ej., *United States Energy Information Administration*<sup>54</sup>, *Energy Agency Energy Balances*<sup>55</sup>). Otras técnicas extrapolan los intercambios energéticos que produce una clase particular de edificio a todos aquellos con las mismas características<sup>56</sup>. También toman considerable importancia los portales abiertos como OSM, de los que se recoge información relativa a la función de los edificios<sup>57</sup> o la fracción de viviendas vacías en áreas residenciales<sup>58</sup>.

### **1.1.6 Relación entre el clima urbano y el cambio climático**

Ante la situación de cambio climático a escala global, se hace necesaria la investigación de la evolución del clima urbano en correspondencia con las tendencias climáticas actuales. Este tipo de estudios podría pronosticar el desarrollo del clima urbano y anticipar la frecuencia o intensidad de fenómenos atmosféricos extremos, cada vez más habituales.

El estudio de las observaciones meteorológicas de una región durante un largo periodo de tiempo nos informa de las tendencias climáticas del pasado y su potencial influencia en los espacios urbanos. Algunos estudios acerca de las comparaciones entre las observaciones urbanas y las rurales muestran que las tendencias de los parámetros climáticos (temperatura, precipitaciones) se deben principalmente a procesos relacionados a gran escala, sin que las ciudades contribuyan especialmente<sup>59,60</sup>. Sin embargo, existen estudios que demuestran que la urbanización repercute sustancialmente en las tendencias climáticas de la región: el aumento de la superficie urbana y el incremento del calor emitido por las actividades humanas han conseguido UHIs cada vez más intensas, favoreciendo el calentamiento atmosférico de la región circundante<sup>61</sup>, incluso para zonas urbanas abiertas y con poca densidad de población<sup>62</sup>. En cuanto a las precipitaciones, a pesar de que existen estudios climatológicos que manifiestan una intensificación de las precipitaciones en las ciudades, no se ha demostrado el impacto de las ciudades en la evolución de las tendencias climáticas de sus regiones colindantes<sup>59,63</sup>.

El estudio de la frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos en el pasado puede ayudar a predecirlos en el futuro y a prevenir daños materiales y humanos<sup>64</sup>. Los principales eventos extremos que se producen en las ciudades son las olas de calor y

las inundaciones. Son numerosos los estudios que señalan que las olas de calor serán cada vez más frecuentes e intensas en el futuro<sup>65</sup>. Además, las olas de calor potencian la magnitud de las UHIs. De hecho, las olas de calor son cada vez más frecuentes y duraderas en la ciudad que en el extrarradio<sup>64,66</sup>. Por otro lado, el número de inundaciones registradas ha ido creciendo a lo largo de los años. Sin embargo, no está claro a que este aumento se deba a la intensificación de las precipitaciones, sino a una mayor exposición urbana al riesgo de inundación por la expansión de las ciudades<sup>64</sup>.

El reto de estudiar la evolución del clima urbano en el contexto de un clima global cambiante presenta ciertos problemas<sup>5</sup>. Uno de ellos es que los modelos generales de circulación o los modelos climáticos regionales no incluyen a las ciudades debido a su escasa resolución: entre ~100–150 km para los modelos generales y entre ~10–50 km para los regionales. Otra dificultad que presentan los modelos actuales es que no contemplan una parametrización específica de las superficies urbanas. Por tanto, los modelos actuales no contienen la información necesaria de las interacciones de las ciudades con el clima local o regional. Para solventar estos inconvenientes, se han propuesto en los últimos años nuevos métodos para el estudio del impacto del cambio climático en las ciudades. Estos métodos incluyen directamente las parametrizaciones de los modelos urbanos en los modelos climáticos regionales, y se incluyen en el contexto del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Por ejemplo, se ha demostrado una mejor simulación de la UHI nocturna si se considera un modelo detallado de la ciudad, en vez de su reemplazo habitual en los modelos por rocas<sup>67</sup>.

En cuanto a la evolución de las UHIs en el contexto actual de clima cambiante, las primeras simulaciones de modelos que incluyen a las ciudades han demostrado que las islas urbanas de calor nocturnas se mantienen estables o se debilitan ligeramente<sup>68</sup>. En invierno, esta atenuación se debe principalmente al menor uso de las calefacciones por el aumento de la temperatura global. Sin embargo, estas simulaciones no han tenido en cuenta la potencial expansión urbana. La introducción de esta variable en las simulaciones ha demostrado que las UHIs se intensifican como resultado de las alteraciones en los procesos de intercambio energético que se dan en la superficie, así como un incremento las emisiones de calor por las actividades humanas<sup>69,70</sup>.

Finalmente, las futuras condiciones de vida en las ciudades se verán afectadas por las tendencias climáticas tanto urbanas como globales. Diversos estudios alertan del aumento de los golpes de calor<sup>71,72</sup>. Además, las olas de calor, cada vez más frecuentes, incrementarán el consumo de energía destinada al aire acondicionado<sup>73</sup>.

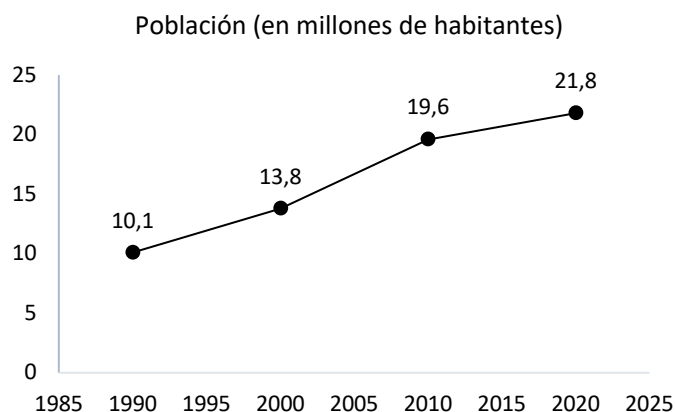
## 1.2. Descripción de la ciudad de Pekín

### 1.2.1 Pekín

La ciudad de Pekín (Beijing) es el centro político, cultural, científico y académico de la República Popular de China. Debido a la larga tradición urbanística de la ciudad – fue fundada hace 3000 años<sup>74</sup>–, podemos encontrar un patrimonio cultural y arquitectónico de gran importancia a escala global, como la Ciudad Prohibida, numerosos templos históricos o los famosos barrios tradicionales conocidos como *hutongs*. Pekín es la segunda ciudad más grande de China –por detrás de Shanghái– y uno de los núcleos económicos más importantes del país. El mercado inmobiliario ha sido uno de los principales pilares en el crecimiento económico desde la década de 1990 –con la liberalización del sector y la inversión privada–, impulsando un rápido desarrollo urbano. La rápida evolución de la estructura urbana ha cambiado el diseño físico de la ciudad, tanto en las zonas previamente construidas como en la región municipal adyacente (**Figura 4**). Recientemente, el gobierno chino ha impulsado un plan territorial que pretende conectar las áreas suburbanas de la región Beijing-Tianjin-Hebei, lo que supone la creación de una megalópolis que contaría con una población de 130 millones de personas<sup>75</sup>.

La municipalidad de Pekín se compone de 16 distritos urbanos y 2 condados y se expande a lo largo de más de 16000 km<sup>2</sup>, de los cuales el área urbana ocupa una extensión aproximada de 4500 km<sup>2</sup><sup>76</sup>. La población de todo el municipio ha crecido desde los 10,1 millones de habitantes en 1990 hasta 21,8 millones en 2020 (**Gráfico 1**), donde un 86% es población urbana, según el último censo oficial<sup>77</sup>. Además, hay que tener en cuenta unos 8 millones de personas de otras zonas del país cuyo lugar de trabajo se encuentra en Pekín y que no son contabilizadas por el censo oficial<sup>78</sup>.

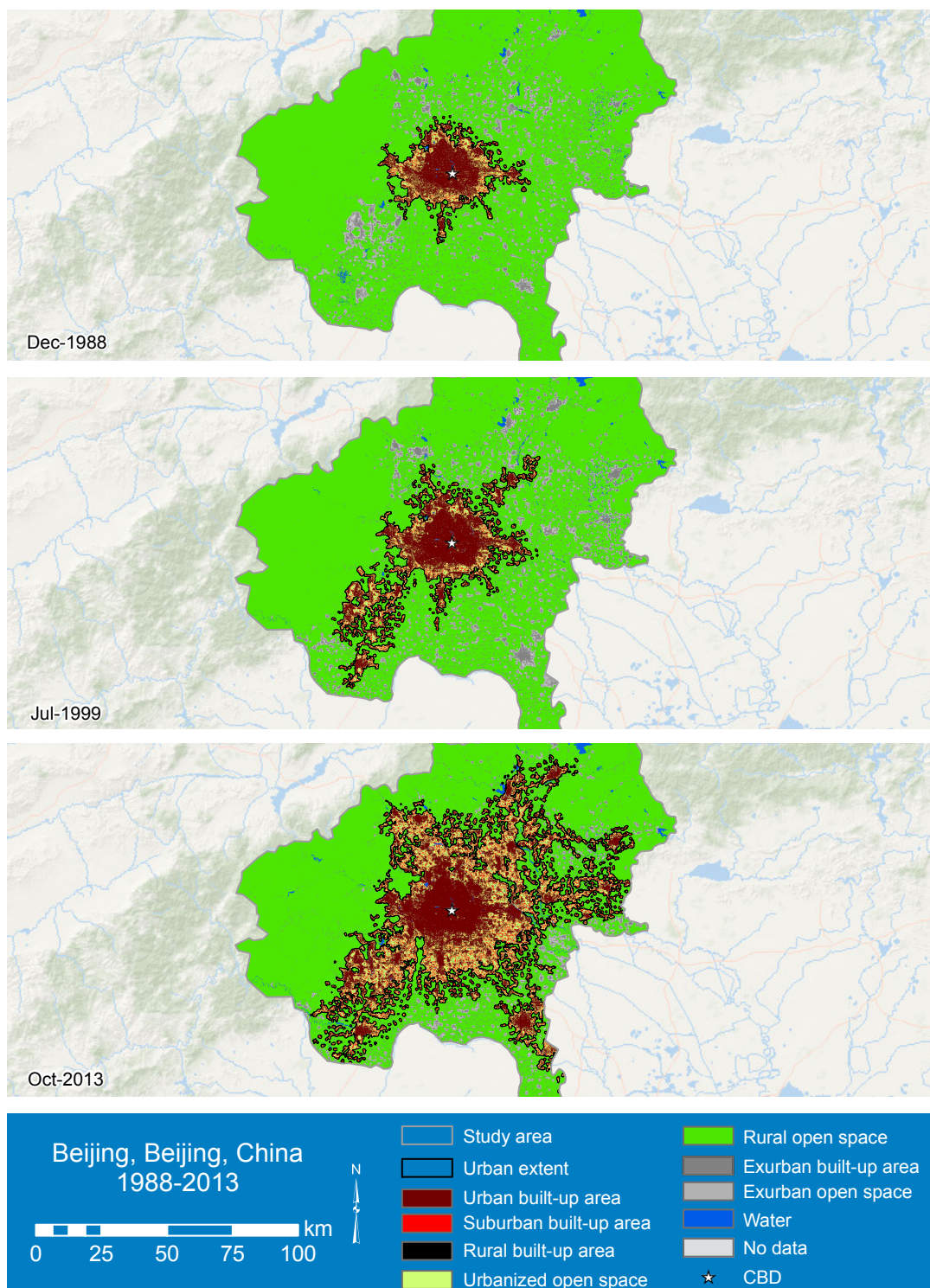
Pekín se sitúa en la Llanura Norte, una amplia región geográfica que apenas registra desniveles o importantes masas de agua. Esta localización ha permitido que Pekín se pueda expandir espacialmente. El traslado de factorías al extrarradio, la construcción de ciudades satélite, las reformas de la tierra y la vivienda y la instalación de nuevas vías de comunicación han contribuido a la vertiginosa transformación de la ciudad<sup>79</sup>.



**Gráfico 1.** Población en millones de habitantes de la ciudad de Pekín desde el año 1990 hasta el 2020, según el Departamento Nacional de Estadística de China (*National Bureau of Statistics of China*)<sup>77</sup>.



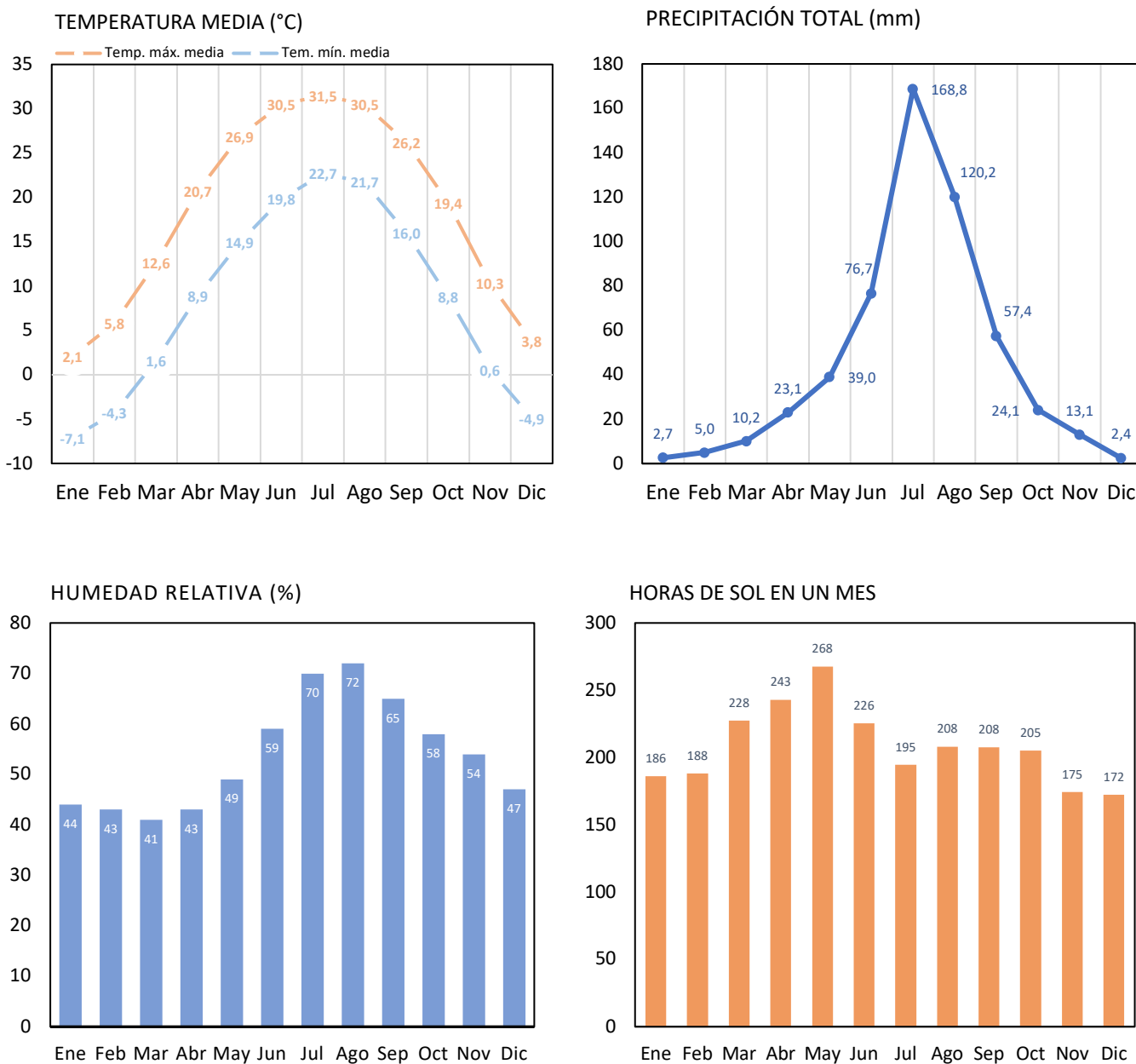
La estructura urbana de Pekín ha quedado dividida, *grosso modo*, por varias carreteras de circunvalación (CC), o *anillos*, donde la 2ª CC es la más interna y la 6ª, la más externa. Dentro de la 4ª CC se concentran las principales actividades económicas y socioculturales de la ciudad. Por lo tanto, la 4ª CC representa, en términos generales, el límite entre el centro urbano y las zonas suburbanas. En algunas zonas, como al norte de la ciudad, este límite se extiende incluso más allá de la 5ª CC.



**Figura 4.** Extensión de la superficie urbana de Pekín en los años 1988, 1999 y 2013. La superficie construida alcanza los 4500 km<sup>2</sup>. Fuente: *Atlas Urban Expansion*<sup>76</sup>.

### 1.2.2 Clima

El clima de Pekín es de tipo continental (Dwa, según la clasificación climática de Köppen<sup>80</sup>): los inviernos son fríos y secos debido a las masas de aire siberiano que se desplazan hacia al sur a través de la meseta de Mongolia; los veranos son calurosos a causa de los vientos cálidos y húmedos de los monzones que provienen del sur. Estos monzones son los responsables de la mayor parte de las precipitaciones que se producen en Pekín: más del 60% del agua caída en la ciudad corresponden a los meses de verano (jun–jul–ago)<sup>81</sup>. En el **Gráfico 2** se muestran los valores de las temperaturas expresadas en °C, la precipitación media total en mm, la humedad relativa y las horas de sol de cada mes.



**Gráfico 2.** Temperatura media (máxima y mínima), precipitación total, humedad relativa y horas de sol durante los meses del año. Fuente: climate-data.org<sup>82</sup>

### 1.2.3 Desarrollo y estructura urbana

A pesar de que el gobierno municipal goce de gran autonomía en la gestión y administración de Pekín, el gobierno nacional ha jugado un papel crucial en el desarrollo de las funciones urbanas y estructurales.

Antes de 1949, la mayoría de las construcciones que se realizaban en Pekín tenían lugar en el casco histórico, dentro de la actual 2ª CC. La fundación de la República Popular de China supuso un gran impacto en el desarrollo de la ciudad. El nuevo estado socialista puso como objetivo la industrialización del país y Pekín pasó de tener una economía consumidora a una productora. La capital acaparó cuantiosas inversiones para su desarrollo industrial<sup>83</sup> y supuso el comienzo de la expansión hacia la periferia<sup>79</sup>.

Hasta la década de 1970, la expansión se acentuó entre la 2ª y 3ª CC, y estuvo caracterizada por las creaciones de los llamados *patios de unidades de trabajo*, nuevos barrios en los que se concentraban en un mismo espacio urbano el hogar, el trabajo y los servicios básicos (sistema *Danwei*)<sup>84</sup>.

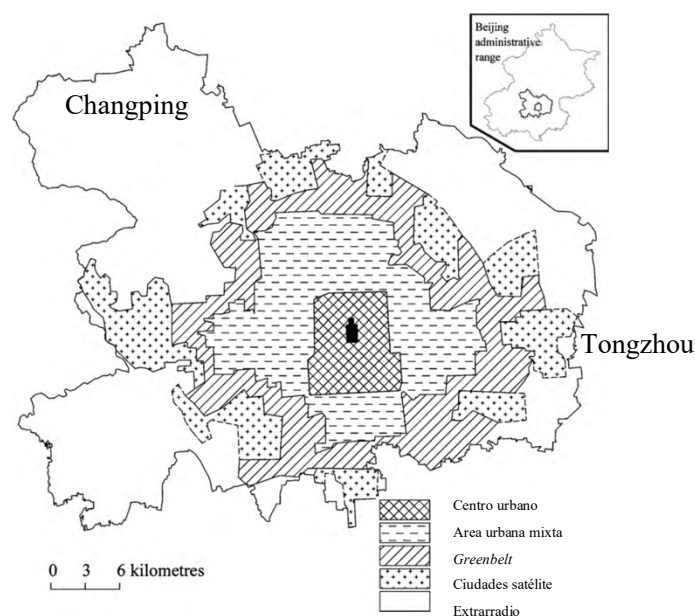
Sin embargo, debido a la Revolución Cultural, casi la mitad de los proyectos propuestos para la construcción de nuevos núcleos suburbanos nunca se llevó a cabo. Además, la conclusión de este inestable periodo de la política nacional supuso el fin de la economía planificada y su sustitución por una economía de mercado. El nuevo modelo introdujo cambios en el comportamiento socioeconómico de la población y contribuyó a la deslocalización de los lugares de trabajo<sup>85</sup>, evidenciando el fracaso del sistema *Danwei*. La liberalización de la economía significó el comienzo de un periodo de apertura y reforma hacia finales de la década de 1970 que contribuyó al veloz desarrollo económico de la ciudad de Pekín. Al comienzo de la nueva década, cerca del 60% de las actividades manufactureras y el 75% de la población ocupada del municipio se agrupaban en las zonas más céntricas de la creciente urbe<sup>86</sup>. Entre 1988 y 1999 se duplicó la superficie edificada del núcleo urbano y a comienzos del nuevo milenio ya estaban construidas la 3ª y la 4ª CC. Además, los habitantes de Pekín comenzaron a instalarse espontáneamente en las zonas suburbanas buscando un lugar residencial más espacioso y evitando la sustancial congestión de tráfico de zonas más céntricas. De esta manera, a partir del año 2000, aumentó el número de barrios residenciales y de ciudades satélite<sup>79</sup>.

Con el objetivo de reducir el tráfico, proteger del deterioro al casco histórico y limitar el crecimiento urbano desmesurado, se propuso un nuevo plan urbanístico basado en un renovado diseño *policéntrico*, aunque similar en muchos aspectos al antiguo sistema *Danwei*. El objetivo es trasladar fábricas y población del centro urbano a ciudades satélites como Tongzhou, Shunyi o Yizhuang<sup>87</sup>. En el actual plan urbanístico (*Master Plan*) de Pekín (**Figura 5**) la ciudad queda dividida en 4 sectores<sup>88</sup>:

- Centro urbano: el corazón de la ciudad tiene una extensión de unos 60 km<sup>2</sup> y cuenta con una población de más de 2 millones de habitantes. La modernización urbanística de la zona choca con los esfuerzos de preservar el casco histórico.
- Área urbana mixta: rodeando al centro histórico se encuentra una extensa superficie urbana de aproximadamente 300 km<sup>2</sup>. Tras la introducción de la economía de mercado en el país, esta área se desarrolló rápidamente, cambiando el paisaje y la vida socioeconómica de la ciudad. La mayoría de las fábricas se

trasladaron a las afueras y fueron sustituidas por distritos financieros y barrios residenciales. El número de habitantes alcanza los 8 millones.

- Cinturón verde o *greenbelt*: el objetivo del *greenbelt* es contener el crecimiento desmesurado de la superficie urbana. Además, incluye una importante área de explotación agrícola. Sin embargo, la continua falta de inversión y de políticas de protección ha dejado desamparada esta región en beneficio del desarrollo urbano, y, ahora, su extensión no llega a un tercio de lo que se planeó inicialmente<sup>89</sup>.
- Ciudades satélite: se crearon numerosos núcleos de población con el objetivo de combinar en un mismo espacio funciones urbanas similares. Sin embargo, al igual que con el sistema *Danwei*, han surgido diversos problemas para su asentamiento definitivo: el centro de la ciudad y su expansión continuaron recibiendo la mayoría de las inversiones debido la infraestructura ya existente y a los menores costes para su desarrollo; la nueva economía de mercado no consiguió ensamblar el empleo y la vivienda –a pesar de la construcción de las CC y la ampliación del metro–; el sistema público de transportes no pudo sostener el desarrollo de estos complejos urbanísticos, y la población mantuvo su preferencia de vivir en zonas más céntricas<sup>90</sup>. Algunos de estos núcleos de población son Tongzhou, que alcanza el millón de habitantes, o el distrito de Changping, que llega a albergar cerca de 2 millones de personas.



**Figura 5.** Plan urbanístico actual de Pekín. Dentro de la 2ª CC se encuentra el centro urbano. El resto del área urbana se reparte dentro de la 4ª CC. En el extrarradio, se encuentran las ciudades satélites. Fuente: Zhao (2010)<sup>87</sup>.

En resumen, el plan original de diseño *policéntrico* no tuvo en cuenta el impacto de la nueva economía ni las preferencias socioculturales. Así que, el diseño físico de la ciudad de Pekín sigue siendo esencialmente *monocéntrico*.

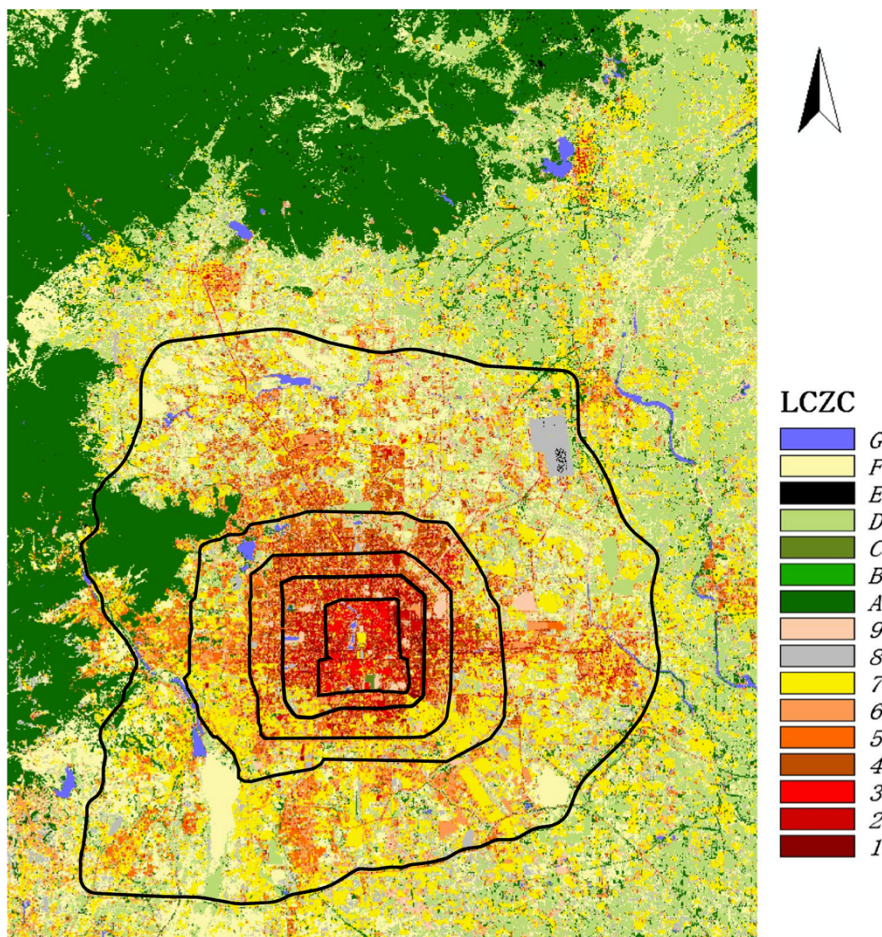
Debido al carácter *monocéntrico* de la ciudad, es posible que las contribuciones a la UHI por motivos antropogénicos (aire acondicionado, calefacciones, tráfico, etc.) sean aún más significativas.

### 1.2.4 Zonas climáticas locales de Pekín (LCZ)

Mu et al.<sup>91</sup> han clasificado las LCZ, introducidas por Stewart & Oke<sup>3</sup>, de la ciudad de Pekín, gracias al portal WUDAPT. Los datos se obtuvieron gracias a las imágenes satelitales del *Landsat 8*. En el mapa de la **Figura 6**, se puede observar la heterogeneidad de las superficies de la ciudad.

Por un lado, existen algunas LCZ que reducen la huella de la isla urbana de calor en el mismo centro de la ciudad:

- Masas de agua: junto a la histórica Ciudad Prohibida, dentro del parque Zhongnanhai, se conectan tres pequeños lagos llegando a ocupar una superficie de más de 100 ha. Otra masa de agua relevante es el lago Yuyuan, al este de la ciudad y dentro de la 3ª CC, que se extiende a lo largo de 60 ha.
- Zonas verdes: dentro de la 2ª CC, apenas existen zonas verdes de gran extensión, a excepción del parque Tiantan Gongyuan, que cuenta con un área de unas 270 ha y se sitúa al sur de la ciudad. Al norte y bifurcado por la 5ª CC, se encuentra el Parque Forestal Olímpico, con una extensión de 680 ha.

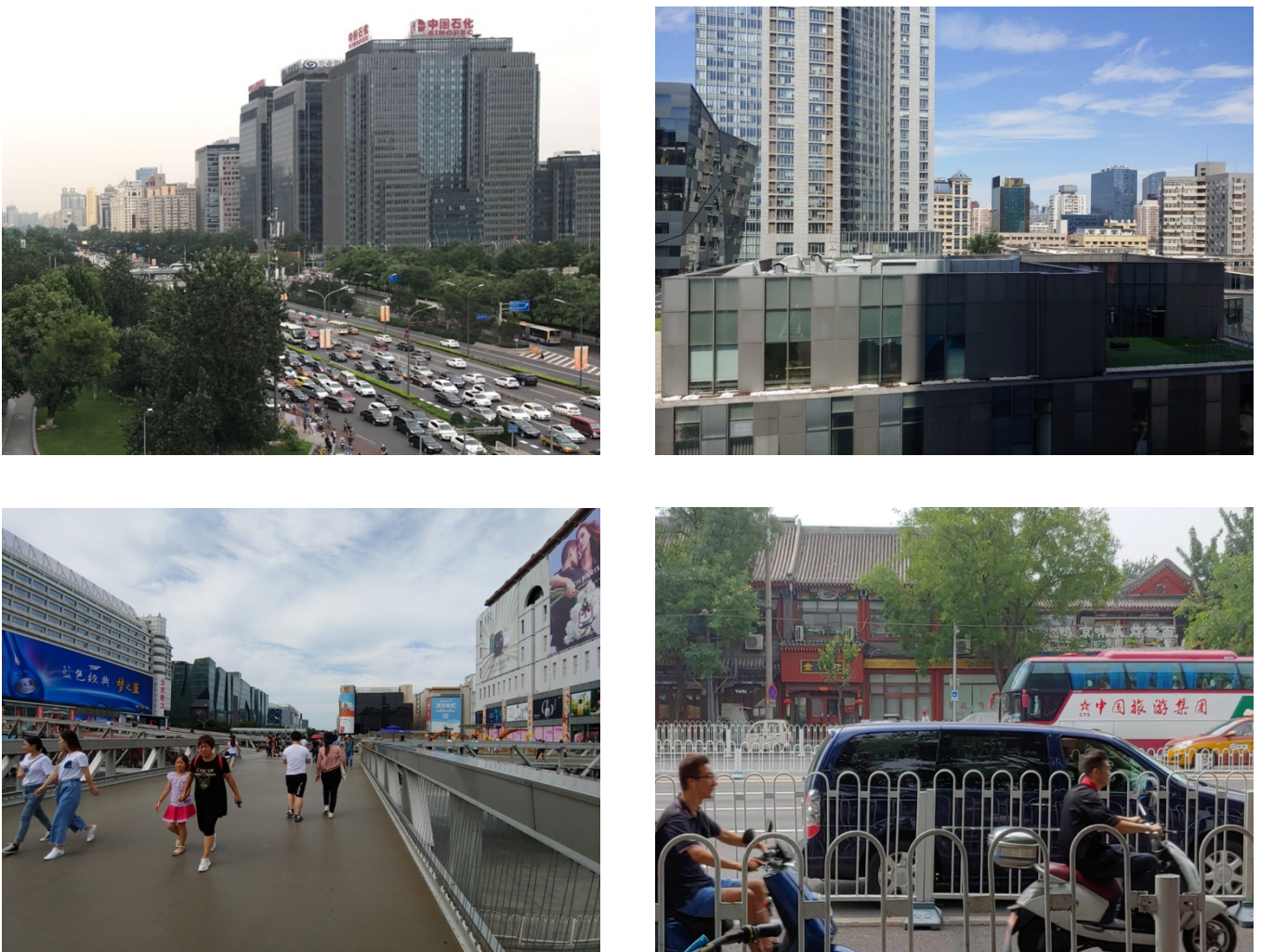


**Figura 6.** Distribución de las zonas climáticas locales (LCZ) en Pekín. Fuente: Mu et al. (2019)<sup>91</sup>.

Fuera de la ciudad, los terrenos montañosos de Yanshan, al norte, y de Xishan, al oeste, congregan prácticamente todas las LCZ de tipo A (bosque denso) de la región mostrada en el mapa.

Por otro lado, las zonas urbanas más densas se encuentran dentro de la 4ª CC, y llegan hasta la 5ª CC en la zona norte. El extrarradio alberga principalmente LCZ del tipo 7 (poca elevación y densidad de construcción) y D (vegetación de escasa altura), aunque algunas ciudades satélite hacen contraste con alta densidad de edificación (Changping al norte, Tongzhou al este o Daxing al sur). En el mapa también se puede apreciar un gran rectángulo gris, correspondiente a una LCZ-8, que representa el Aeropuerto Internacional de Pekín-Daxing y ocupa una superficie total de 4700 ha.

En la **Figura 7** se muestran algunos entornos urbanos de la ciudad de Pekín. La altura de los edificios y la anchura de las calles varían significativamente de un distrito a otro. Por ejemplo, en el distrito de Chaoyang se encuentra el centro financiero de la ciudad con numerosos rascacielos (LCZ-1). Los distritos de Xicheng y Dongcheng albergan algunos de los barrios tradicionales –*hutongs*–, cuyos edificios de baja estatura y escasa cubierta vegetal forman una LCZ del tipo 3.



**Figura 7.** Ejemplos de diferentes LCZ en Pekín. Arriba a la izquierda: parte oriental de la 2ª CC. Arriba a la derecha: distrito de Chaoyang. Abajo a la izquierda: distrito de Xicheng. Abajo a la derecha: distrito de Dongcheng. El distrito de Chaoyang cuenta con cerca de 4 millones de habitantes, lo que lo convierte en el distrito más poblado de Pekín. Los distritos de Xicheng y Dongcheng se encuentran dentro de la 2ª CC en la zona occidental y oriental, respectivamente. Fuente: elaboración propia.

### 1.3 Objetivos

- Estudiar las temperaturas superficiales medias, máximas y mínimas de la ciudad de Pekín y de sus zonas rurales circundantes.
- Cuantificar la intensidad de la isla urbana de calor superficial (SUHI) de Pekín.
- Estudiar la distribución espacial de la SUHI.
- Analizar mediante un modelo armónico la tendencia de la temperatura media en las zonas urbanas, suburbanas y rurales.

### 1.4 Estructura del trabajo

El trabajo se ha dividido en tres secciones principales.

En la primera parte de la *Introducción*, se ha definido el concepto de isla urbana de calor y el origen de su formación. También se han descrito algunos de los principales métodos de estudio de este fenómeno urbano y, finalmente, se ha discutido brevemente su relación con el cambio climático a escala global. En la segunda parte, se ha descrito el clima de Pekín, así como la estructura de la ciudad y el desarrollo urbanístico de los últimos años.

En la *Descripción experimental*, se detallará el procedimiento seguido para la obtención y análisis de los datos proporcionados por MODIS.

En la sección *Resultados*, se presentarán los valores de las temperaturas medias, máximas y mínimas por estaciones y por meses y su distribución espacial. También se expondrá la tendencia de la temperatura media de las zonas urbanas, suburbanas y rurales.

---

## 2. Descripción experimental



## 2.1 Material: MODIS

El desarrollo de la tecnología de los sensores térmicos ha permitido la observación de las islas urbanas de calor y el estudio de sus causas desde una perspectiva diferente. Los sensores térmicos, acoplados a satélites u otras aeronaves, reparan en las diferencias radiativas de la superficie terrestre. Los balances energéticos de la superficie dan cuenta de su temperatura.

Al contrario de lo que sucede con las medidas *in situ* realizadas por las estaciones meteorológicas, las medidas realizadas por los sensores térmicos no dejan de ser observaciones indirectas<sup>20</sup>: es necesario considerar la intervención de la atmósfera (contaminación por nubes y/o aerosoles) y de las características radiativas de la superficie que puedan influir en la emisión o reflexión de la radiación. Además, la medida realizada por el sensor depende de la geometría y la estructura de la superficie en cuestión. Por ejemplo, es posible que una parte no despreciable de la superficie urbana no llegue a ser visualizada debido a la estructura tridimensional de la ciudad. Por tanto, es necesaria, al menos, la corrección *a posteriori* de los efectos atmosféricos, ya que se podría malinterpretar la magnitud de la SUHI, y evitar en la medida de lo posible las observaciones desde latitudes altas.

En este estudio, hemos utilizado los datos recogidos por los sensores MODIS, a bordo de los satélites de la NASA *Terra* y *Aqua* del programa EOS (*Earth observing systems*)<sup>92</sup>. Estos sensores miden 36 bandas espectrales entre las longitudes de onda de 0,405 y 14,385  $\mu\text{m}$ , con tres diferentes resoluciones espaciales: 250, 500 y 1000 m.

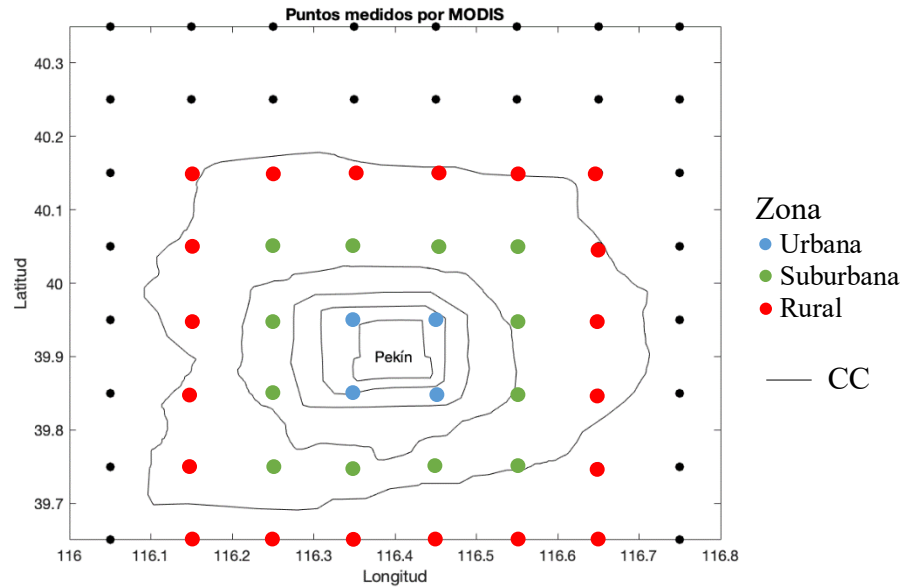
Los datos se obtuvieron directamente desde la página <https://neo.sci.gsfc.nasa.gov>, de donde se descargaron los archivos “CSV for Excel” relativos a *Average Land Surface Temperature [Day]* y a *Average Land Surface Temperature [Night]* (temperatura media mensual superficial diurna y nocturna, respectivamente) con una resolución espacial de 0,1°, en el periodo de tiempo comprendido entre febrero de 2000 hasta enero de 2021 (21 años). Esta serie de datos pertenece al catálogo *MOD11C3 Version 6*<sup>93</sup>.

La información que permite calcular la temperatura superficial se recopila a partir de las observaciones independientes de 7 bandas del espectro infrarrojo. Los valores de la temperatura superficial se obtienen gracias a la aplicación del algoritmo de partición *split-window* (SWA)<sup>94</sup>. Este algoritmo identifica el tipo de superficie que emite la radiación –gracias a las bandas 31 y 32–, separa las contribuciones de la columna de vapor de agua atmosférico y de la temperatura del aire más próximo a la superficie, y corrige las dependencias de la radiación con respecto al ángulo de visión del sensor.

La validez y consistencia de los resultados obtenidos se comparan con referencias *in situ*. La precisión llega a ser de 1 °C, y en la mayoría de los casos mejora hasta 0,5 °C. Varios estudios independientes avalan este resultado<sup>95,96</sup>. En el caso de la ciudad de Pekín, se ha comprobado la consistencia de la relación entre la temperatura superficial y la magnitud de la UHI<sup>97</sup>. Otro estudio<sup>98</sup> avala la dependencia de la UHI con la SUHI durante la noche, pero revela diferencias importantes en intensidad y forma espacial durante el día.

## 2.2 Metodología

Los datos obtenidos a través de MODIS muestran las temperaturas medias mensuales diurnas y nocturnas de la superficie de Pekín. Las coordenadas de los puntos en los que se mide la temperatura se muestran a continuación en la **Figura 8**. Además, se han representado las CC con el objetivo de tener una referencia de la ciudad.



**Figura 8.** Coordenadas (en grados) de los puntos en los que MODIS mide la temperatura. Los puntos marcados en azul están situados en el centro de la ciudad; los puntos señalados en verde dan cuenta de las zonas suburbanas y los rojos representan el límite de la ciudad con las zonas rurales. Las líneas continuas representan las CC.

La temperatura media de las temperaturas registradas en el centro de la ciudad (puntos marcados en azul) será nombrada de aquí en adelante como  $T_{urb}$ , y la temperatura media de aquellas registradas en el límite de la ciudad (rojo) serán  $T_{rural}$ . La diferencia entre estas dos temperaturas superficiales se define como la intensidad de la isla urbana de calor superficial:

$$\text{intensidad de la SUHI} = T_{urb} - T_{rural} \quad (1)$$

En las siguientes secciones se mostrarán los resultados más significativos en lo relativo a la distribución espacial de la SUHI y su evolución temporal. Se hará distinción entre las temperaturas diurnas y nocturna, y se compararán tanto por estaciones<sup>i</sup> como por meses. Con el objetivo de buscar una relación entre la expansión de la ciudad y la intensidad de la SUHI, se utilizarán las temperaturas de las todavía en extensión zonas suburbanas (marcadas en verde).

Los mapas se han elaborado con ayuda del programa *Matlab*. El método de interpolación escogido en la distribución de temperaturas ha sido *v4*, basado en la *interpolación spline biarmónica*.

El tratamiento y análisis de datos ha sido realizado con *Excel*.

<sup>i</sup> Primavera: marzo–abril–mayo; verano: junio–julio–agosto; otoño: septiembre–octubre–noviembre; invierno: diciembre–enero–febrero.

### 2.2.1 Indicadores estadísticos

Asimismo, haremos uso de algunos indicadores estadísticos con el fin de describir la distribución de las temperaturas urbana y rural. Utilizaremos los siguientes indicadores de posición, de dispersión y de forma<sup>99</sup>.

#### Indicadores de posición

- Media: es el valor promedio de un conjunto de datos numéricos y se calcula como la suma de los valores  $x_i$  dividido entre el número total de valores  $N$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^N x_i}{N} \quad (2)$$

- Mediana ( $Q_2$ ): en un conjunto de datos ordenados, hace referencia al valor de la variable situada en la posición central.
- Cuartiles ( $Q_1$  y  $Q_3$ ): la mediana divide al conjunto de datos en dos mitades.  $Q_1$  (primer cuartil) es la *mediana* de la primera mitad del conjunto de datos, mientras que  $Q_3$  (tercer cuartil) lo es de la segunda mitad.

#### Indicadores de dispersión

- Rango intercuartílico (IQR): es la medida robusta más común y se define como la diferencia entre los dos cuartiles

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (3)$$

- Desviación estándar ( $s$ ): indica cuán dispersos están los datos con respecto a la media. Se calcula de la siguiente manera:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (4)$$

#### Indicadores de forma

- Curtosis: también conocida como medida de apuntamiento, determina la cantidad de datos que hay cercanos a la media. Cuanto mayor sea el grado de curtosis, más escarpada, o apuntada, será la forma de la curva de distribución. Se halla de la siguiente manera:

$$C = \frac{N(N + 1) \sum_i^N (x_i - \bar{x})^4}{(N - 1)(N - 2)(N - 3)s^4} - \frac{3(N - 1)^2}{(N - 2)(N - 3)} \quad (5)$$

Dependiendo del valor de  $C$  y en comparación con una distribución normal o de Gauss, la forma de la curva puede ser:

- Leptocúrtica ( $C > 0$ ), esto es, más escarpada que la distribución normal.
  - Platicúrtica ( $C < 0$ ), es decir, más achatada que la normal.
  - Mesocúrtica ( $C = 0$ ), similar a la distribución de Gauss.
- Índice de Yule–Kedall: este indicador robusto da cuenta de la simetría de la distribución. Compara la distancia de la mediana a cada uno de los dos cuartiles:

$$\gamma_{YK} = \frac{Q_1 + Q_3 - 2 Q_2}{IQR} \quad (6)$$

Una distribución con una cola a la derecha, es decir, con valores muy altos a la derecha, determina un índice de Yule–Kendall positivo. Una distribución con una cola a la izquierda tendrá, por tanto, un índice de Yule–Kendall negativo.

### 2.2.2 Tendencia de la temperatura

Por último, estudiaremos la tendencia de las temperaturas medias diurna y nocturna mediante un modelo armónico. Este tipo de análisis armónico se utiliza frecuentemente para el estudio de ciclos durante periodos definidos de tiempo.

En un primer lugar, proponemos la siguiente expresión, que involucra una parte lineal y una parte armónica:

$$T(t) = A_0 + B_0 t + (C_0 + D_0 t) \cos(\omega t - \theta) \quad (7)$$

donde  $T$  es la temperatura urbana, suburbana o rural –según el caso–,  $t$  es el tiempo en meses desde febrero de 2000 hasta enero de 2021,  $A_0$  es la temperatura media inicial,  $B_0$  es la variación de la temperatura media durante el periodo de estudio,  $C_0 + D_0 t$  considera una variación lineal de la amplitud con el tiempo y  $\cos(\omega t - \theta)$  representa la evolución de la temperatura, siendo  $\omega$  igual a  $2\pi$  dividido entre el número de meses que tiene un año.

Con la finalidad de ajustar de forma sencilla el modelo, transformamos la ecuación (7) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} T(t) &= A_0 + B_0 t + C_0 \cos(\omega t - \theta_1) + D_0 t \cos(\omega t - \theta_2) = \\ &= A_0 + B_0 t + C_0 \cos \omega t \cos \theta_1 + C_0 \sin \omega t \sin \theta_1 + \\ &+ D_0 t \cos \omega t \cos \theta_2 + D_0 t \sin \omega t \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (8)$$

Obteniendo finalmente:

$$T(t) = A_0 + B_0 t + c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t + d_1 t \cos \omega t + d_2 t \sin \omega t \quad (9)$$

siendo  $C_0 = \sqrt{c_1^2 + c_2^2}$  y  $D_0 = \sqrt{d_1^2 + d_2^2}$ .

Mediante un ajuste de regresión lineal múltiple, se determinan los coeficientes  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$  y  $d_2$ . De esta manera, podemos obtener los valores de las siguientes cantidades:

- $A_0$ : temperatura media inicial.
- $B_0$ : variación de la temperatura media en el periodo de un mes.
- $C_0$ : amplitud de la temperatura media. Nos indica la variación máxima de la temperatura en un año.
- $D_0$ : variación de la amplitud en el periodo de un mes.

Para comprobar la correlación de la temperatura media con el tiempo de nuestro modelo armónico, se realizarán los test de significación para el coeficiente de correlación de Pearson  $r$ . Utilizaremos dos métodos:

Mediante el p-valor

*Excel* no facilita el p-valor a partir del coeficiente de correlación, sino a partir del valor de la  $t$  de Student. La ecuación

$$t = \frac{r \sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} \tag{10}$$

permite obtener  $t$  en función de  $r$ , donde  $n$  es el número de valores de la distribución (252). Con este valor  $t$  y a través de la función DISTR.T() hallamos el p-valor. Siempre que el p-valor sea menor que el nivel de significación  $\alpha$  elegido (0,1%, 1% y 5%), podremos asegurar que existe evidencia suficiente de una correlación significativa entre la temperatura y el tiempo de nuestro modelo armónico.

Mediante los valores críticos del coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación  $r$  será significativo si está por encima del valor crítico  $r_c$  (en valor absoluto), calculado para cada nivel de significación  $\alpha$ :

$$r_c = \frac{t}{\sqrt{t^2 + n - 2}} \tag{11}$$

donde  $t$  representa el valor de la  $t$  de Student hallado con la función DISTR.T.INV() de *Excel* y  $n$ , el número de valores de la distribución.

En la **Tabla 2** se disponen los niveles de significación  $\alpha$ , el valor de la  $t$  de Student y el coeficiente de correlación crítico para un número de 252 valores:

$\alpha$	$t$	$r_c$
0,1%	3,330	0,206
1%	2,596	0,162
5%	1,969	0,124

**Tabla 2.** Coeficientes críticos de correlación de Pearson para los niveles de significación 0,1%, 1% y 5%.

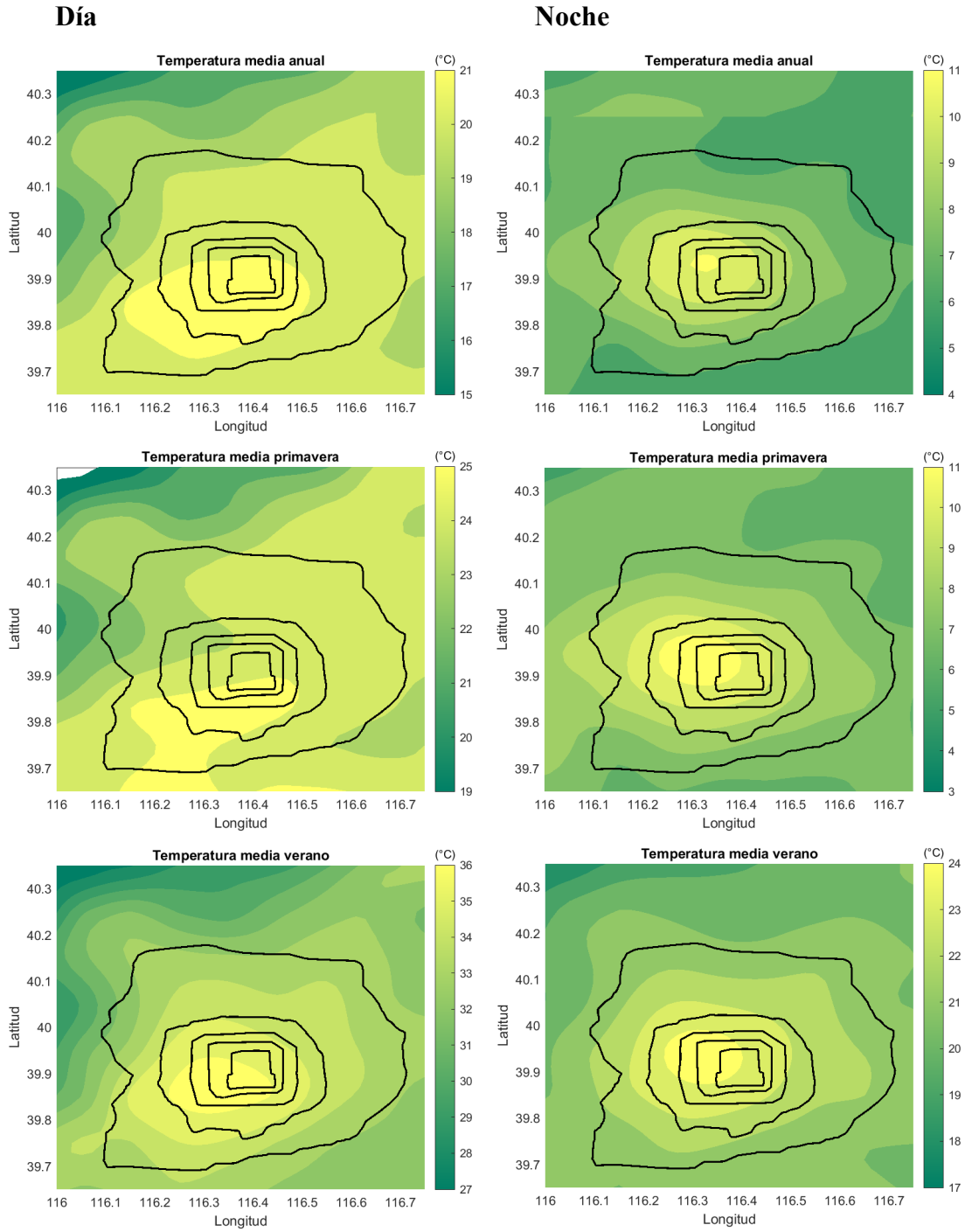
---

# 3. Resultados

### 3.1 Distribución espacial

#### 3.1.1 Temperatura media

A continuación, la **Figura 9** muestra distintos mapas con la distribución espacial de las temperaturas medias anuales y estacionales, tanto diurnas (izquierda) como nocturnas (derecha).



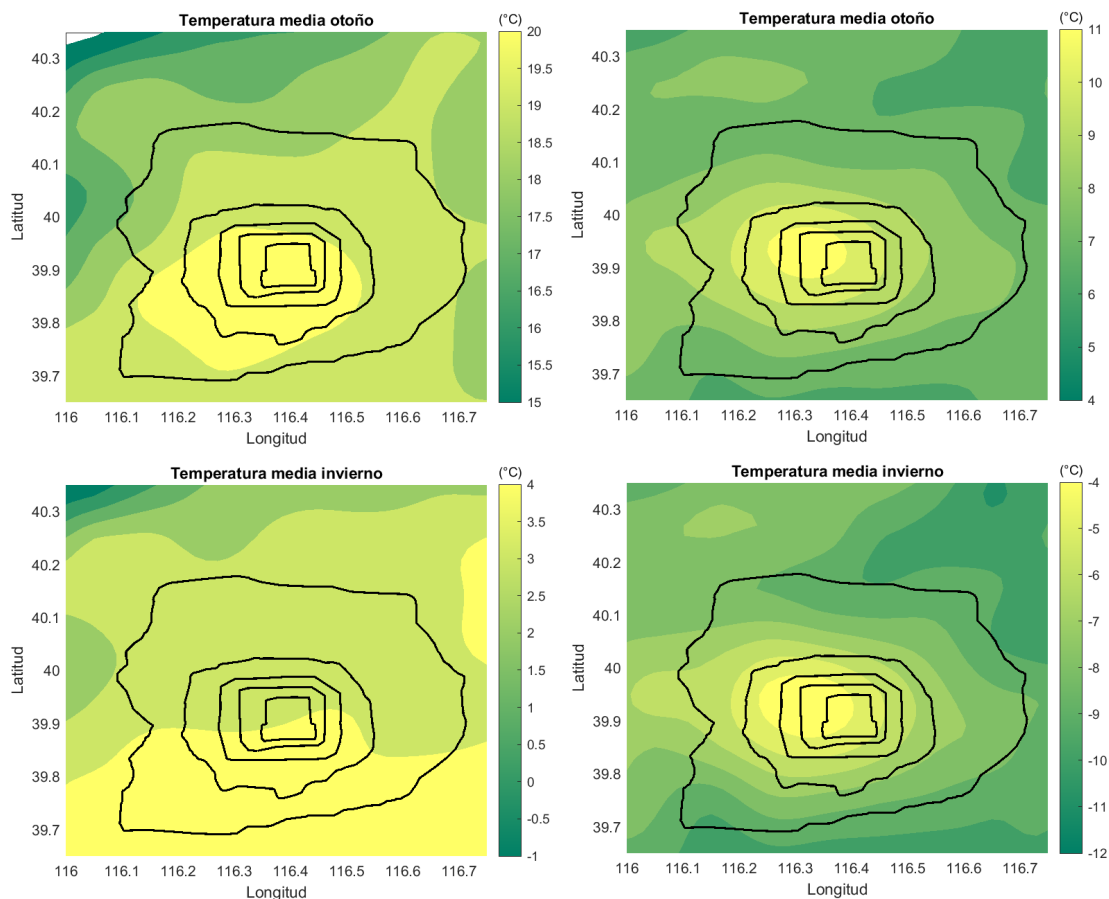


Figura 9. Distribución espacial de las temperaturas medias anual y estacional. Coordenadas en grados.

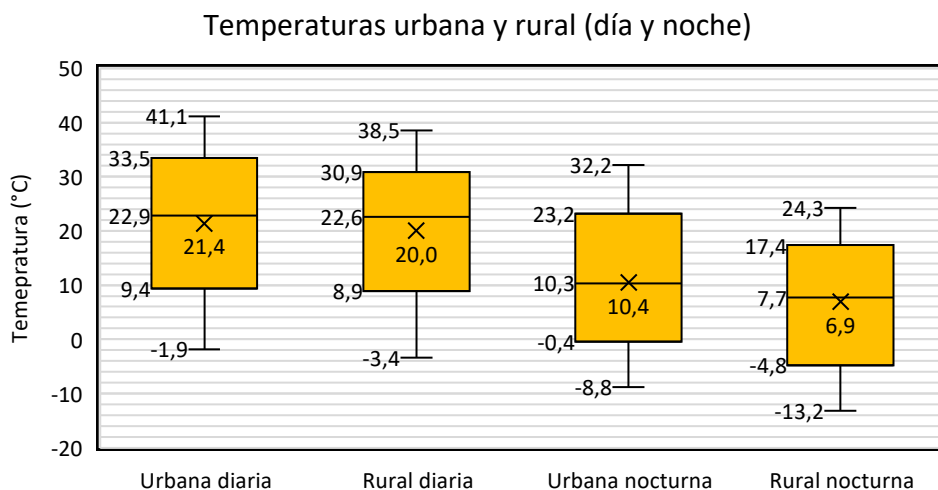
La SUHI es más significativa y está mejor definida en la noche debido a la acumulación de calor en los materiales urbanos durante las horas de sol. Además, esta SUHI nocturna aparece en la parte occidental de Pekín. En cambio, la SUHI diurna no está tan definida como la nocturna salvo en los meses de verano, cuando aparece de nuevo en la parte oeste de la ciudad. En la **Tabla 3** se muestran las temperaturas medias urbana y rural junto con la intensidad de la SUHI para cada época del año. Solo en verano la intensidad de la SUHI es mayor durante el día que durante la noche. La razón es la enorme absorción de radiación solar por los materiales urbanos (asfalto, hormigón, etc.), que elevan no poco su temperatura.

MEDIA (°C)	Día			Noche		
	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	SUHI	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	SUHI
Primavera	24,8	24,2	0,6	10,5	7,3	3,1
Verano	35,8	32,8	3,0	23,7	21,2	2,4
Otoño	20,5	18,9	1,6	10,4	7,4	3,0
Invierno	4,0	4,0	0,0	-4,6	-8,5	4,0
Anual	21,4	20,0	1,4	10,0	6,8	3,1

Tabla 3. Temperaturas medias rural y urbana e intensidad de la SUHI en primavera, verano, otoño, invierno y anual.



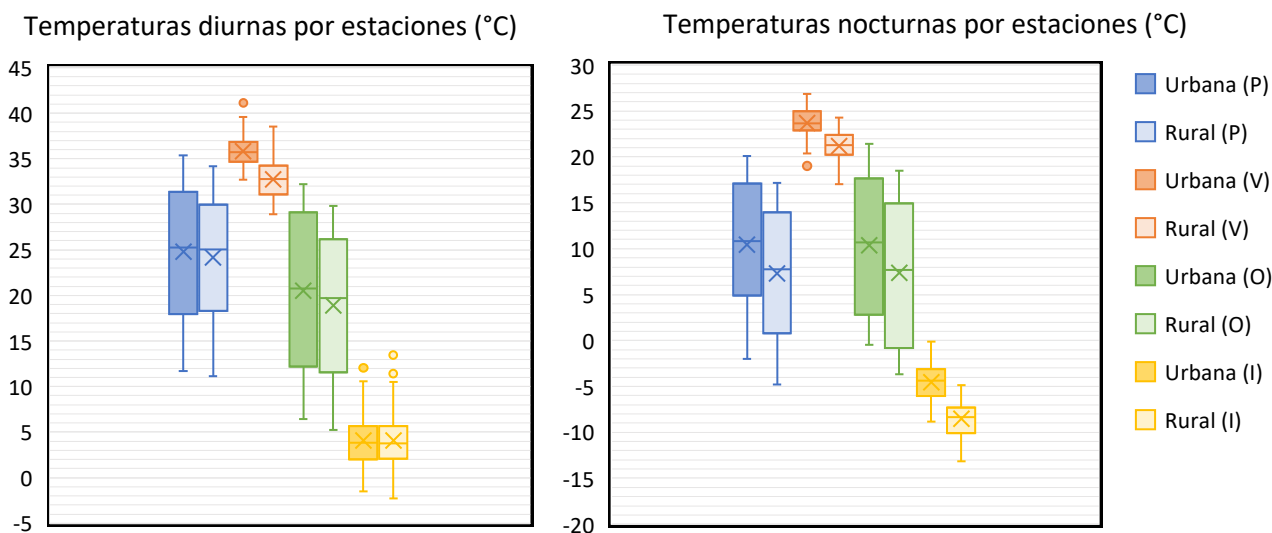
La isla de calor urbana diurna de menor intensidad tiene lugar en los meses de invierno, cuando apenas existen diferencias entre las temperaturas urbana y rural. No obstante, durante la noche invernal, la SUHI alcanza la mayor intensidad del año con hasta 4,0 °C de diferencia entre la ciudad y el campo. En promedio, la diferencia de temperaturas medias anual es de 1,4 °C durante el día y de 3,0 °C durante la noche.



**Gráfico 3.** Diagramas de cajas de las temperaturas superficiales urbana y rural (diurna y nocturna). Los valores que aparecen corresponden, de arriba abajo, al extremo superior, tercer cuartil, mediana, media (marcada con la “x”), primer cuartil y extremo inferior.

En el **Gráfico 3**, se disponen los diagramas de cajas de las temperaturas superficiales urbana y rural desde febrero de 2000 hasta enero de 2021. En un primer lugar, observamos que los valores más altos registrados corresponden a las temperaturas urbanas diurnas, y los valores más bajos a las temperaturas rurales durante la noche. En un segundo lugar, durante el día, la media y la mediana se diferencian por 1,5 °C y por 2,6 °C en las temperaturas urbana y rural, respectivamente, siendo mayor la mediana en ambos casos. En el caso de las temperaturas nocturnas urbanas, la diferencia entre la media y la mediana es menor, lo que indica una distribución simétrica en las temperaturas. En cuanto a la dispersión de los datos, las temperaturas rurales cuentan con IQR de 22,0 °C (día) y 22,2 °C (noche), mientras que los IQR de las temperaturas urbanas son un tanto mayores, con valores de 24,1 °C (día) y 23,6 °C (noche).

Entrando aún más en detalle, el **Gráfico 4** muestra los diagramas de cajas de las temperaturas superficiales diurnas y nocturnas para cada una de las estaciones del año. En el caso de las temperaturas diurnas, observamos una gran dispersión en las temperaturas de primavera (P) y otoño (O), mientras que en verano (V) y en invierno (I) el rango de temperaturas es mucho menor. De nuevo, como ya habíamos visto en la **Tabla 2**, las temperaturas medias urbanas diurnas son, excepto en el caso del invierno, siempre mayores que las rurales. En particular, en el caso del verano, nos encontramos que las temperaturas de la ciudad son significativamente mayores que en el campo, mientras que en invierno apenas existe diferencia entre estas dos temperaturas. Este hecho puede ser visualizado en los mapas expuestos de la **Figura 9**: la isla urbana de calor es fácilmente distinguible en verano y no se forma en invierno.



**Gráfico 4.** Diagramas de cajas de las temperaturas superficiales urbana y rural (diurna y nocturna) por estaciones: primavera (P), verano (V), otoño (O), invierno (I).

En cuanto a la distribución de las temperaturas nocturnas, encontramos ciertas diferencias con respecto a las diurnas. En este caso, las temperaturas urbanas son, en general, mayores que en las zonas rurales, evidenciando la existencia de la isla urbana de calor. Este contraste es significativo en los meses de verano y de invierno. En las temperaturas nocturnas otoñales y las nocturnas primaverales, tanto urbanas como rurales, las medias y medianas son prácticamente coincidentes, diferenciándose del caso diurno. De nuevo, los mapas de la **Figura 9** proporcionan información adicional acerca de la distribución espacial de las temperaturas y ayudan a complementar el estudio de las temperaturas por estaciones.

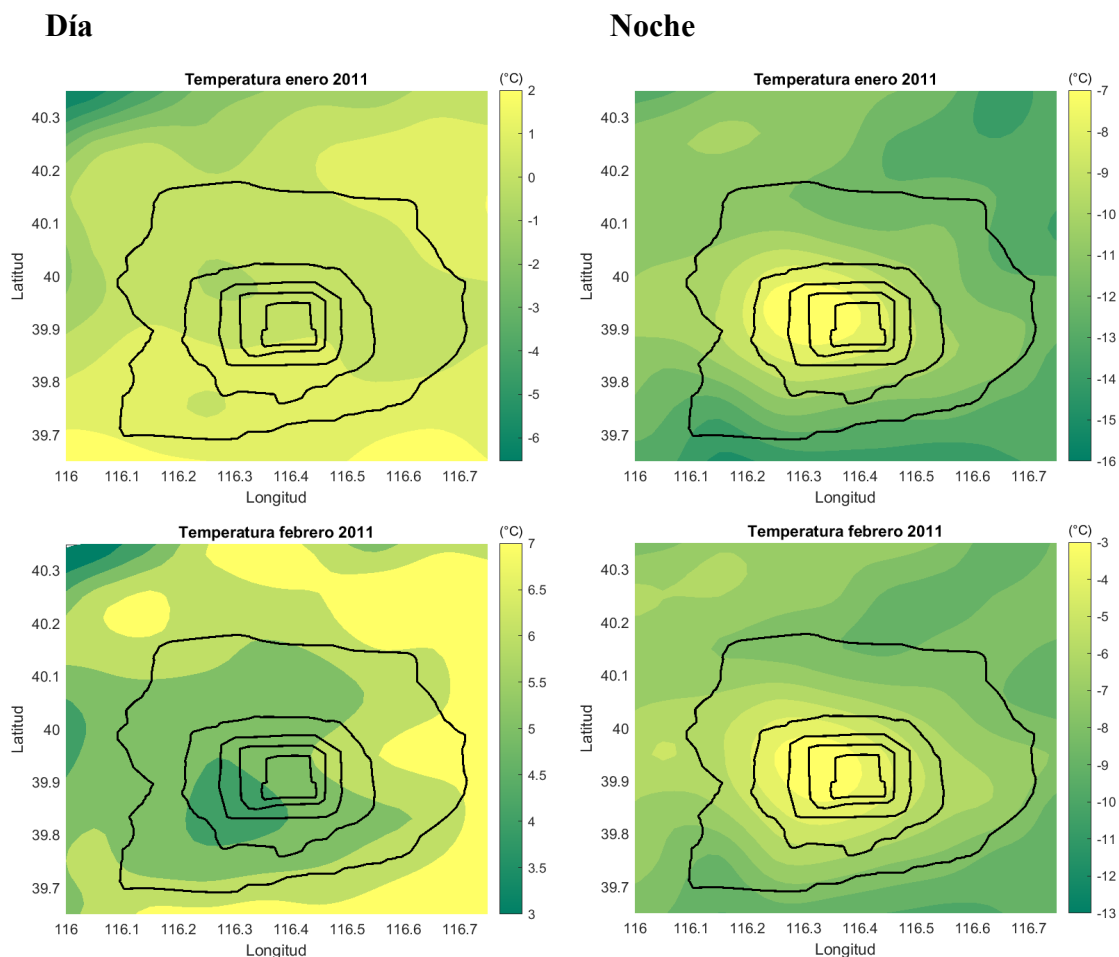
La **Tabla 4** recoge la información relativa a las temperaturas medias urbanas y rurales, así como la intensidad de la isla urbana de calor superficial de cada mes.

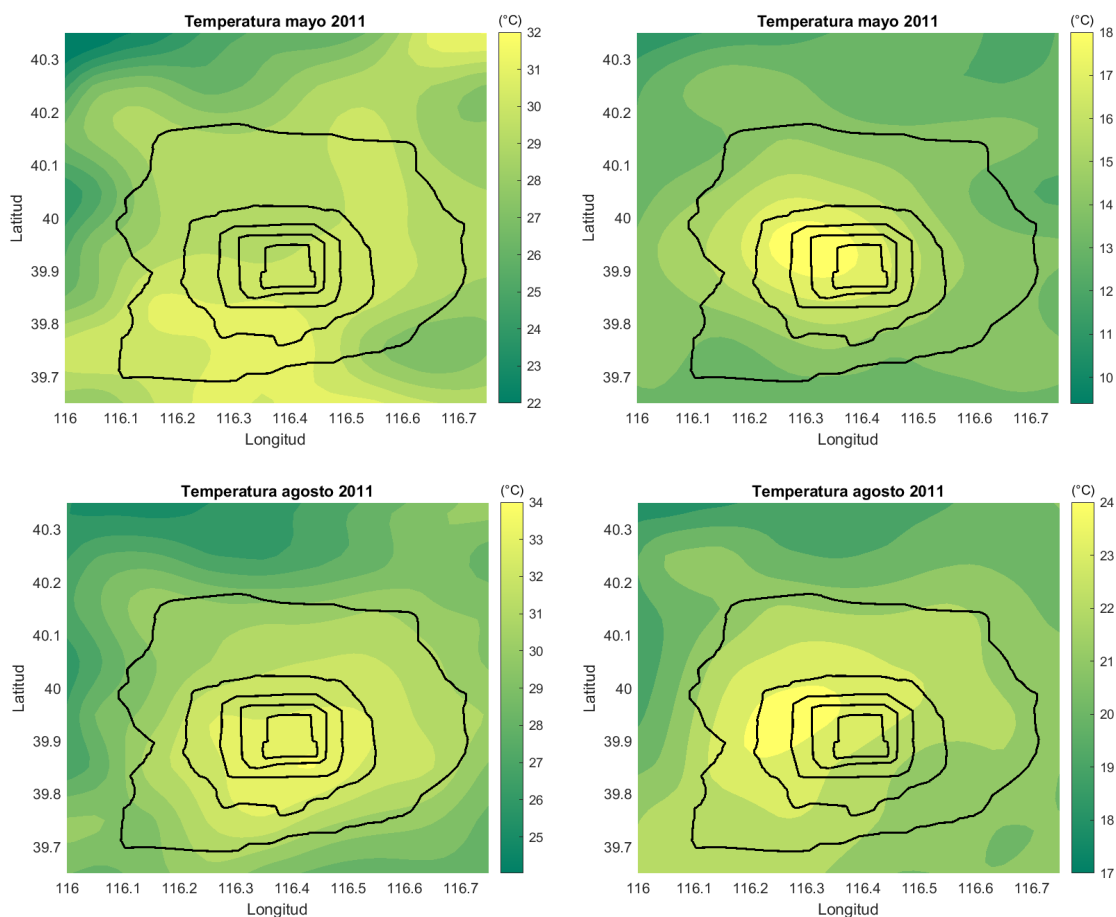
MEDIA (°C)	Día			Noche		
	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	SUHI	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	SUHI
Ene	1,9	1,9	0,0	-6,0	-10,1	4,1
Feb	7,1	7,4	-0,3	-3,2	-7,1	3,9
Mar	16,5	16,7	-0,2	3,3	-0,3	3,6
Abr	25,4	25,1	0,3	10,5	7,4	3,0
May	32,5	30,8	1,6	17,6	14,2	2,7
Jun	35,9	33,9	2,1	22,2	19,7	2,5
Jul	36,9	33,7	3,2	25,0	22,7	2,3
Ago	34,6	30,8	3,8	23,7	21,2	2,5
Sep	29,9	27,1	2,8	18,5	15,7	2,8
Oct	20,7	19,6	1,1	10,7	7,9	2,8
Nov	10,9	10,1	0,8	2,0	-1,4	3,4
Dic	3,0	2,6	0,4	-4,5	-8,3	3,8

**Tabla 4.** Temperaturas medias urbana y rural e intensidad de la SUHI durante los meses del año.

La mayor intensidad de la isla urbana de calor superficial tiene lugar durante las noches de invierno, cuando las temperaturas urbanas son 3,8 °C (diciembre), 4,1 °C (enero) y 3,9 °C (febrero) más altas que las temperaturas de las zonas rurales. Por otro lado, durante los días de agosto, la diferencia entre las temperaturas urbana y rural también es importante: 3,8 °C. Sin embargo, aunque estas intensidades de la SUHI son similares, se producen por procesos distintos: en los días de agosto, las formaciones de la SUHI es resultado del intenso calentamiento por la acción solar de los materiales urbanos de gran absorción –calzadas, pavimento, etc– y la gran emisión de calor al exterior de los sistemas de aire acondicionado; en las noches invernales, la SUHI se origina por la retención en forma de calor de la radiación solar absorbida durante el día, además de calentamiento adicional por los sistemas de calefacción. Otro hecho relevante tiene lugar durante los meses de febrero y marzo: durante el día las temperaturas en las zonas rurales son mayores que en la ciudad. Por otro lado, el mes de julio registra la menor diferencia en las temperaturas nocturnas: 2,3 °C. Finalmente, tal y como habíamos visto antes en la **Tabla 2**, en los meses de verano la intensidad de la SUHI es mayor durante el día que durante la noche.

En los mapas de la **Figura 10** se muestran algunas distribuciones espaciales particulares de las temperaturas medias mensuales del año 2011. En ellos podemos observar algunas de las características señaladas en la **Tabla 4**. En enero, las temperaturas medias diurnas en la ciudad son iguales que en las zonas rurales, mientras que durante la noche el gradiente de temperaturas es significativo; en febrero, las temperaturas diurnas urbanas llegan a ser más bajas que las rurales; en los días de mayo, la isla urbana de calor no está tan definida como en los meses de verano y, finalmente, en agosto, la intensidad de la SUHI nocturna es menor comparada con el resto del año.





**Figura 10.** Distribución espacial de temperaturas medias de algunos meses del año 2011: enero, febrero, mayo y agosto. Coordenadas en grados.

### 3.1.2 Temperaturas máxima y mínima

El estudio de las temperaturas máximas y mínimas también revela grandes diferencias entre la ciudad y el campo. La temperatura máxima es un importante indicador de la intensidad de las olas de calor que se pueden producir en los meses de verano; mientras que la temperatura mínima revela la magnitud de los episodios de frío intenso en los meses de invierno. Como veremos a continuación, las temperaturas máximas y mínimas registradas desde febrero de 2000 hasta enero de 2021 son, en general, más altas en la ciudad.

En la **Tabla 5**, se muestran las temperaturas máximas urbana y rural y su diferencia  $U - R = T_{urb} - T_{rural}$  según la estación del año. Durante el día, esta diferencia de temperaturas es más acusada en verano; sin embargo, en invierno, las máximas urbanas son menores que las máximas rurales. Durante la noche, las máximas urbanas son más altas que las máximas rurales en todo el año, especialmente en invierno, cuando esa diferencia llega hasta los 4,7 °C.

Por otro lado, en la **Tabla 6**, se recogen las temperaturas mínimas urbana y rural y su diferencia. En este caso, tanto de día como de noche, las mínimas son más elevadas en la ciudad que en el campo, siendo las diferencias entre la temperatura urbana y la rural más destacadas en los días de verano y en las noches de invierno.

En la **Figura 11**, se muestran las distribuciones espaciales de las temperaturas máximas y mínimas anual y de las distintas estaciones del año.

Tanto la **Tabla 5** como la **Tabla 6** son complementarias a la información del **Gráfico 4**, donde podemos observar la situación de los valores extremos con respecto al resto de valores. En el caso de las temperaturas diurnas, existen valores atípicos en las temperaturas de verano y de invierno (temperaturas máximas inusualmente elevadas), mientras que, en las nocturnas, solo el verano presenta valores atípicos en las temperaturas mínimas.

Por último, la **Tabla 7** resume la información relativa las temperaturas máximas y mínimas mensuales.

MÁXIMAS (°C)	Día			Noche		
	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	U-R	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	U-R
Primavera	35,4	34,2	1,2	20,1	17,2	2,9
Verano	41,1	38,5	2,6	26,9	24,3	2,6
Otoño	32,2	29,8	2,4	21,4	18,5	2,9
Invierno	12,1	13,5	-1,4	-0,1	-4,8	4,7
Anual	30,2	29,0	1,2	17,1	13,8	3,3

**Tabla 5.** Temperaturas máximas urbana y rural y su diferencia (U-R = T<sub>urb</sub> - T<sub>rural</sub>) en primavera, verano, otoño, invierno y anual.

MÍNIMAS (°C)	Día			Noche		
	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	U-R	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	U-R
Primavera	11,7	11,1	0,6	-2,0	-4,8	2,8
Verano	32,7	28,9	3,8	19,0	17,0	2,0
Otoño	6,4	5,2	1,2	-0,5	-3,7	3,2
Invierno	-1,9	-3,4	1,5	-8,8	-13,2	4,4
Anual	12,3	10,5	1,8	1,9	-1,2	3,1

**Tabla 6.** Temperaturas mínimas urbana y rural y su diferencia U-R en primavera, verano, otoño, invierno y anual.

MÁXIMAS (°C)	Día			Noche			MÍNIMAS (°C)	Día			Noche		
	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	U-R	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	U-R		T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	U-R	T <sub>urb</sub>	T <sub>rural</sub>	U-R
Ene	4,9	5,7	-0,8	-3,1	-7,7	4,6	Ene	-1,9	-3,4	1,5	-8,8	-13,2	4,4
Feb	12,1	13,5	-1,4	-0,1	-4,8	4,7	Feb	3,7	2,3	1,4	-7,2	-10,6	3,4
Mar	19,8	20,6	-0,8	6,1	2,3	3,8	Mar	11,7	11,1	0,6	-2,0	-4,8	2,8
Abr	28,9	28,5	0,4	13,9	10,6	3,3	Abr	21,1	21,4	-0,3	5,7	3,2	2,5
May	35,4	34,2	1,2	20,1	17,2	2,9	May	28,5	26,4	2,0	15,0	13,0	2,1
Jun	38,9	36,8	2,1	24,7	22,3	2,4	Jun	32,7	30,9	1,8	19,0	17,0	2,0
Jul	41,1	38,5	2,6	26,9	24,3	2,6	Jul	35,2	31,0	4,2	23,3	21,2	2,1
Ago	37,0	32,8	4,2	26,1	23,8	2,4	Ago	33,1	28,9	4,2	21,9	19,6	2,3
Sep	32,2	29,8	2,4	21,4	18,5	3,0	Sep	27,1	25,4	1,6	15,6	12,7	2,9
Oct	23,8	22,6	1,2	12,5	10,0	2,6	Oct	17,4	15,9	1,4	8,5	5,3	3,2
Nov	13,4	13,4	0,0	4,2	0,7	3,5	Nov	6,4	5,2	1,2	-0,5	-3,7	3,2
Dic	5,7	4,9	0,7	-2,3	-5,9	3,6	Dic	-1,0	-2,3	1,3	-7,8	-11,4	3,6

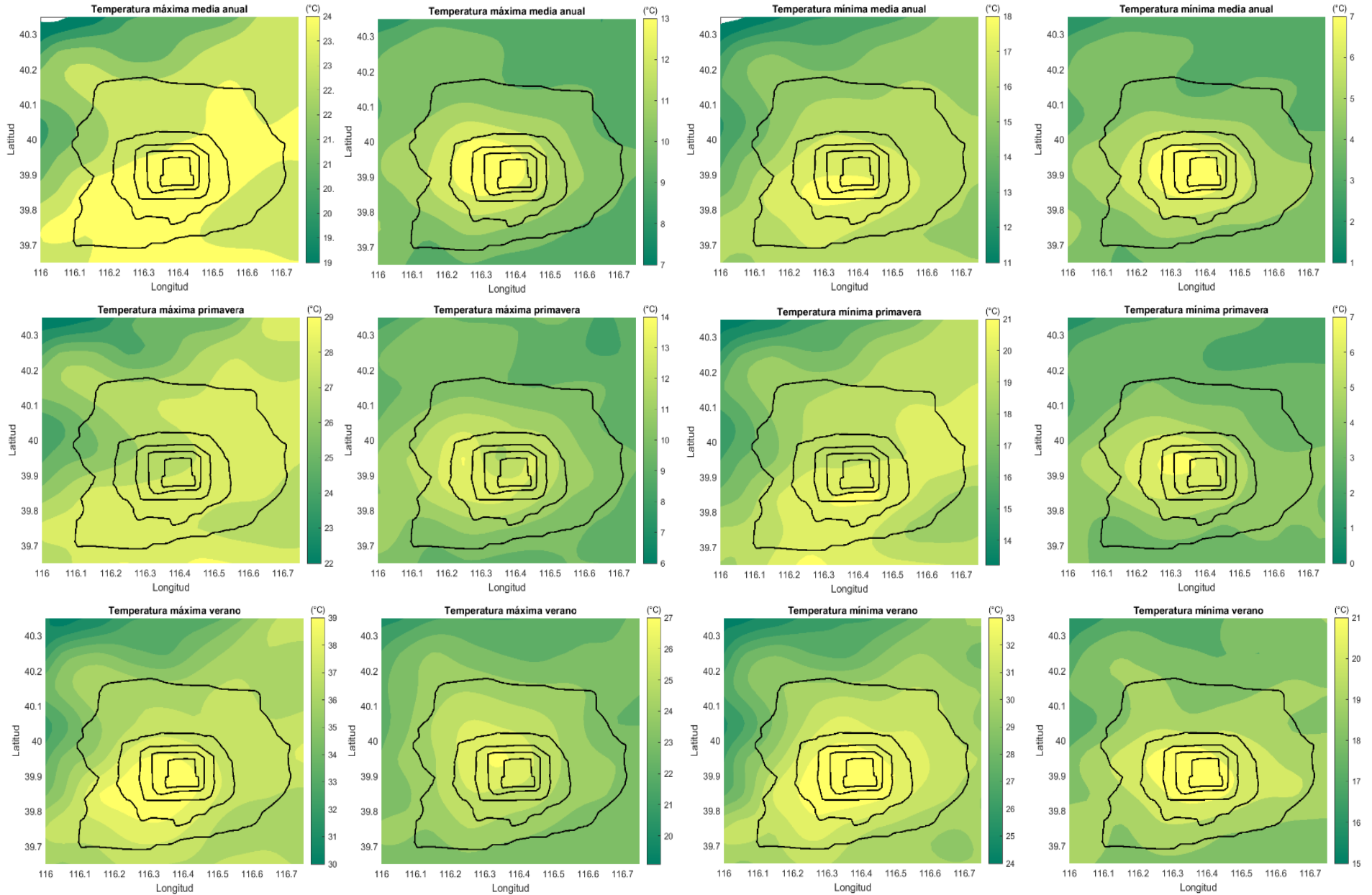
**Tabla 7.** Temperaturas máximas y mínimas urbana y rural y su diferencia U-R según el mes del año.

**MÁXIMAS**  
**Día**

**Noche**

**MÍNIMAS**  
**Día**

**Noche**



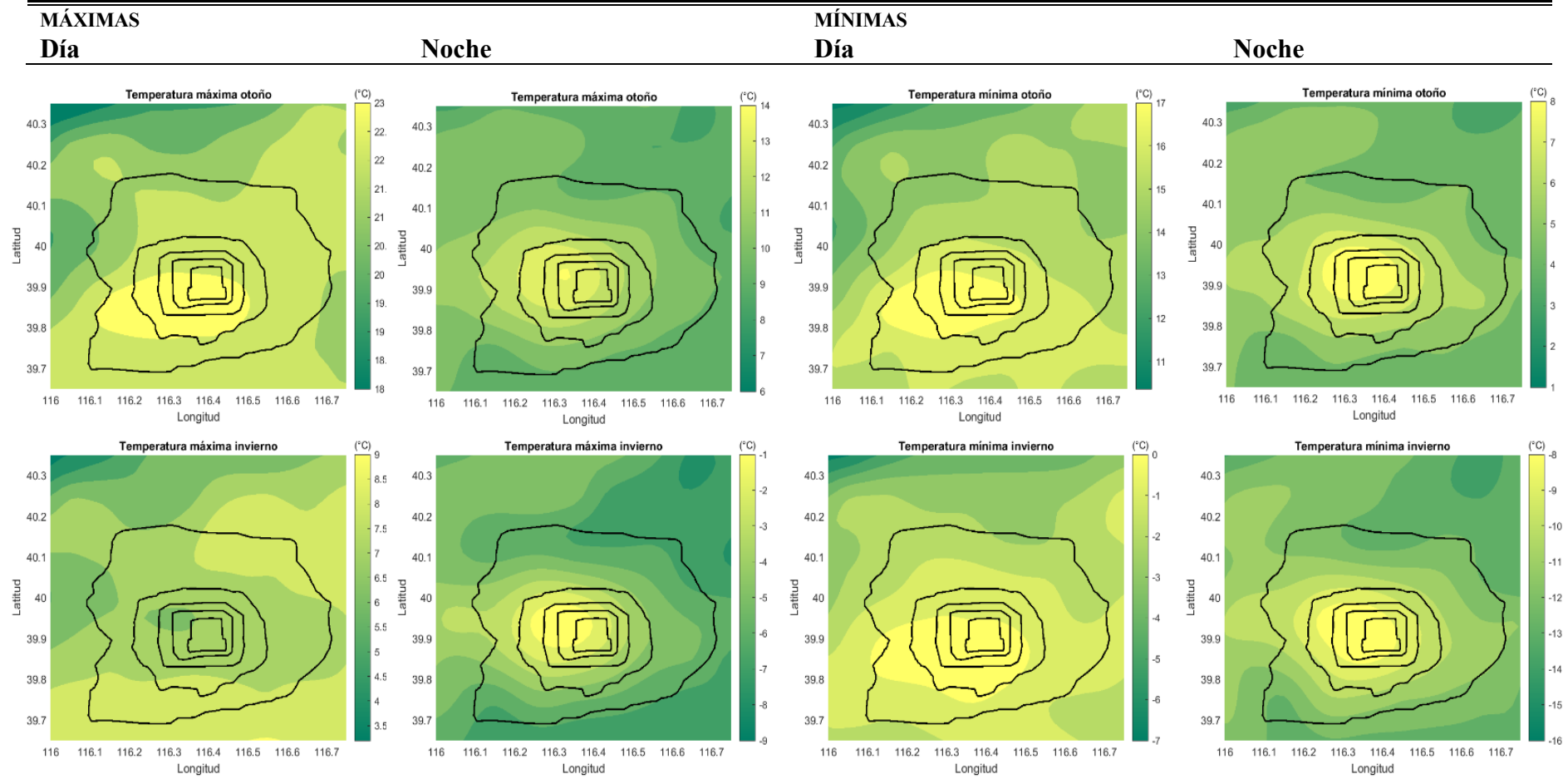


Figura 11. Distribución espacial de temperaturas máximas y mínimas anual y por estaciones. Coordenadas en grados.

## 3.1.3 Otros parámetros estadísticos

DÍA	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural
	Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
Media (°C)	24,8	24,2	35,8	32,8	20,5	18,9	4,0	4,0
Mediana (°C)	25,2	25,0	35,7	32,8	20,7	19,7	3,8	3,8
Q <sub>1</sub> (°C)	17,9	18,3	34,7	31,1	12,2	11,5	2,0	2,1
Q <sub>3</sub> (°C)	31,4	30,0	36,9	34,3	29,2	26,2	5,7	5,7
IQR (°C)	13,4	11,7	2,2	3,2	16,9	14,7	3,6	3,6
s (°C)	6,8	6,1	1,7	2,1	8,0	7,2	2,9	3,2
Y–K	-0,087	-0,157	0,062	-0,071	-0,008	-0,119	0,005	0,061
Curtosis	-1,293	-1,081	0,522	-0,243	-1,403	-1,277	0,169	0,537

NOCHE	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural
	Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
Media (°C)	10,5	7,3	23,7	21,2	10,4	7,4	-4,6	-8,5
Mediana (°C)	10,8	7,7	23,6	21,3	10,7	7,7	-4,4	-8,3
Q <sub>1</sub> (°C)	4,9	0,8	22,9	20,3	2,8	-0,8	-6,1	-10,1
Q <sub>3</sub> (°C)	17,1	14,0	25,0	22,4	17,6	15,0	-3,1	-7,3
IQR (°C)	12,2	13,2	2,1	2,2	14,8	15,7	3,0	2,8
s (°C)	6,2	6,5	1,7	1,6	6,9	7,1	1,9	1,9
Y–K	0,028	-0,054	0,266	0,022	-0,060	-0,079	-0,116	-0,255
Curtosis	-1,315	-1,415	0,390	-0,198	-1,391	-1,447	-0,324	-0,630

**Tabla 8.** Estadísticos según la estación del año. Q<sub>1</sub> y Q<sub>3</sub> son los valores del primer y tercer cuartil; IQR es el rango intercuartílico; s es la desviación estándar y Y–K hace referencia al índice de simetría de Yule–Kendall.

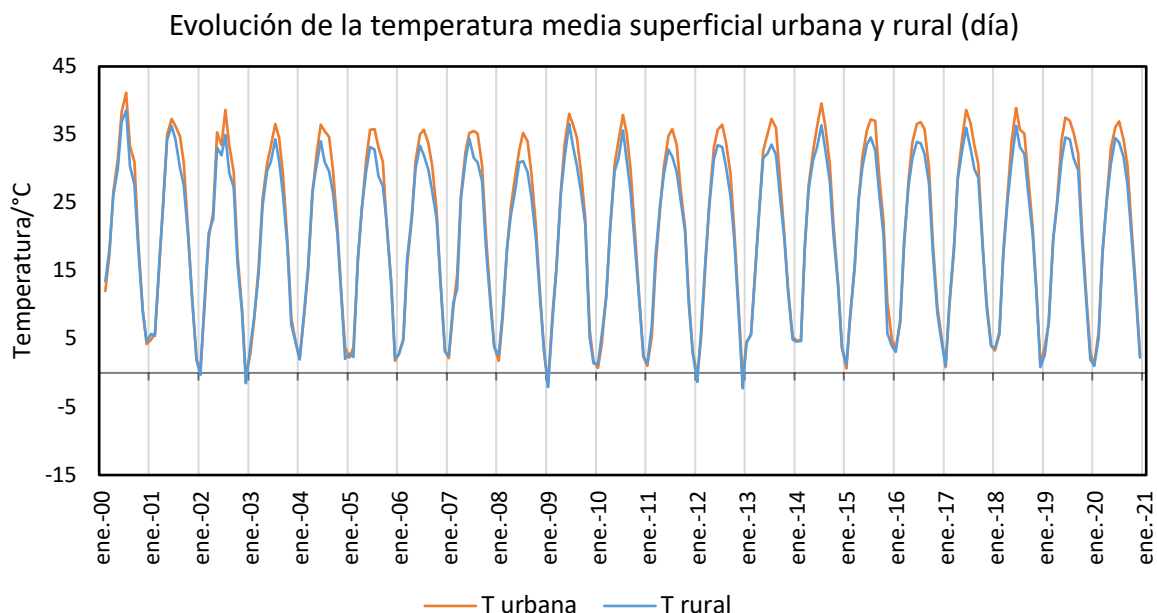
En la **Tabla 8** se muestran algunos de los parámetros estadísticos descritos en la sección **2.2.1** y ofrecen una información adicional a la ya dada por el **Gráfico 4**.

En cuanto a los datos diurnos, lo más relevante es la gran dispersión de las temperaturas en los meses de primavera y otoño. En verano y en invierno, existe una mayor dispersión en las temperaturas de las zonas rurales que en las de la ciudad. Además, en invierno, apenas hay diferencia en la distribución de las temperaturas urbana y rural. Por otro lado, todas las distribuciones son prácticamente simétricas: los valores del índice de Yule–Kendall están muy próximos a cero. Solo la distribución de las temperaturas primaverales de las zonas rurales está ligeramente sesgada hacia la izquierda. Por último, la distribución de las temperaturas otoñales en la ciudad es la más *achatada* de las temperaturas diurnas, mientras que las temperaturas invernales de la zona rural forman una curva más *apuntada*.

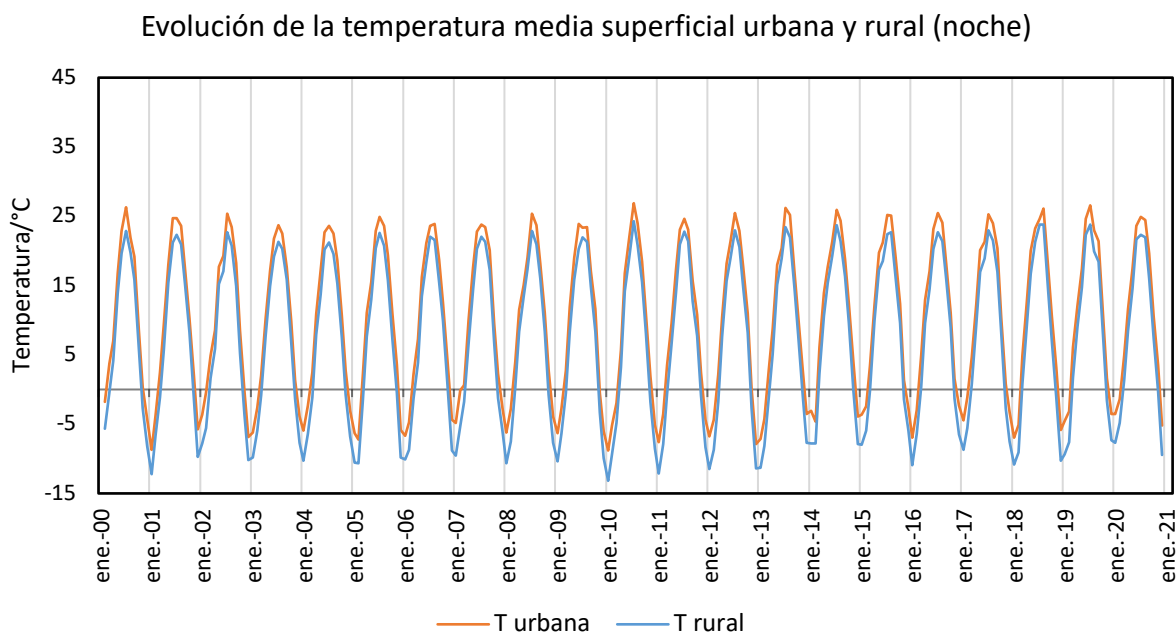
Las temperaturas nocturnas siguen casi el mismo patrón que las diurnas. De nuevo, las distribuciones de las temperaturas primaverales y otoñales muestran una mayor heterogeneidad que las estivales e invernales. Asimismo, en la noche, las temperaturas rurales suelen tener una mayor dispersión que las urbanas, excepto en verano. En cuanto a la simetría, solo las distribuciones de las temperaturas veraniegas urbanas y de las invernales rurales poseen cierta asimetría. Finalmente, la única distribución con curtosis positiva es la de las temperaturas urbanas en verano; el resto de las distribuciones posee un valor de curtosis negativo.



### 3.2 Evolución temporal



**Gráfico 5.** Evolución de la temperatura superficial urbana y rural durante el día. Cada línea de división vertical indica el comienzo de un nuevo año.



**Gráfico 6.** Evolución de la temperatura superficial urbana y rural durante la noche.

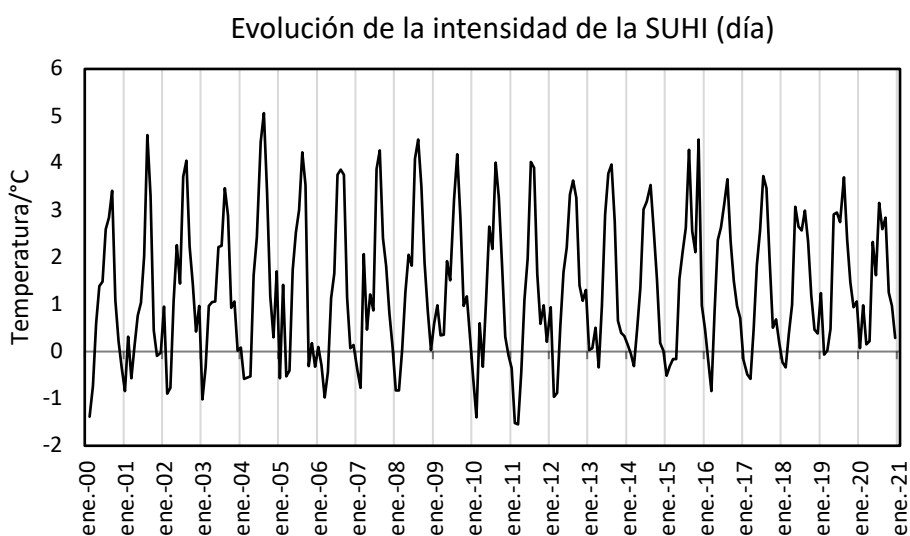
En los **Gráfico 5** y **6** se representan las evoluciones de la temperatura superficial urbana y rural, tanto de día como de noche.

Durante el día, las curvas de las temperaturas superficiales urbana y rural son prácticamente coincidentes salvo en los meses de verano, cuando las temperaturas urbanas son más altas que en las zonas rurales. Los máximos de las temperaturas, tanto urbanas como rurales, tienen lugar en los meses de julio y julio, mientras que los mínimos, en los meses de enero y febrero.

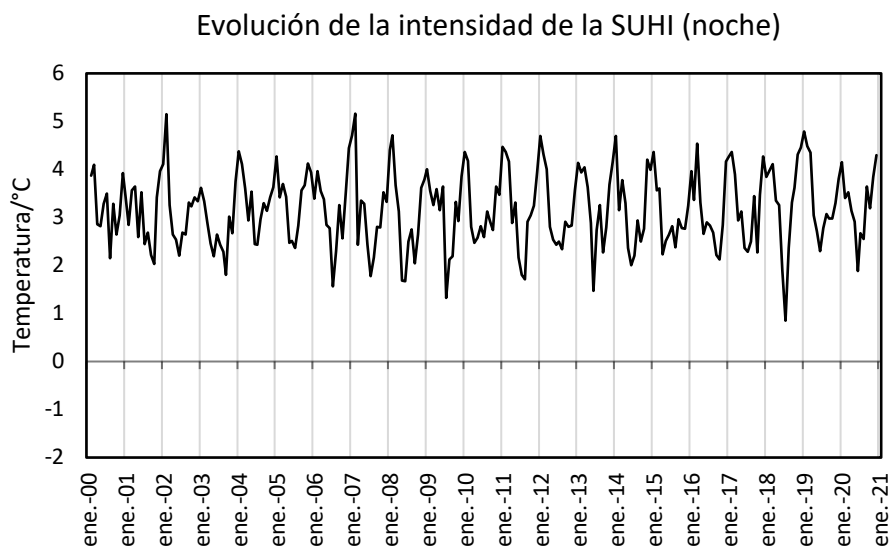
Durante la noche, existe una mayor diferencia entre las temperaturas urbanas y rurales, especialmente en los meses de verano e invierno. En este caso, los máximos de las temperaturas se producen principalmente en el mes de julio, y los mínimos, en el mes de enero.

Con el objetivo de poder visualizar mejor las diferencias entre la evolución de las temperaturas urbana y rural, se han representado en los **Gráficos 7 y 8** las diferencias entre ambas temperaturas. Es decir, se han representado las intensidades de la isla urbana de calor superficial.

Como ya se ha visto previamente en la **Tabla 4**, la SUHI diurna es mayor en los meses de verano, especialmente en agosto, cuando tienen lugar los máximos principales del **Gráfico 7**. En agosto del año 2004, las temperaturas urbanas diurnas llegaron a ser 5,1 °C más altas que las rurales. Además, aunque en los meses de noviembre la intensidad de la isla urbana no es esencialmente significativa, en el año 2015 las temperaturas en la ciudad fueron 4,5 °C más elevadas que en el campo.



**Gráfico 7.** Evolución de la intensidad de la isla urbana de calor superficial diurna.

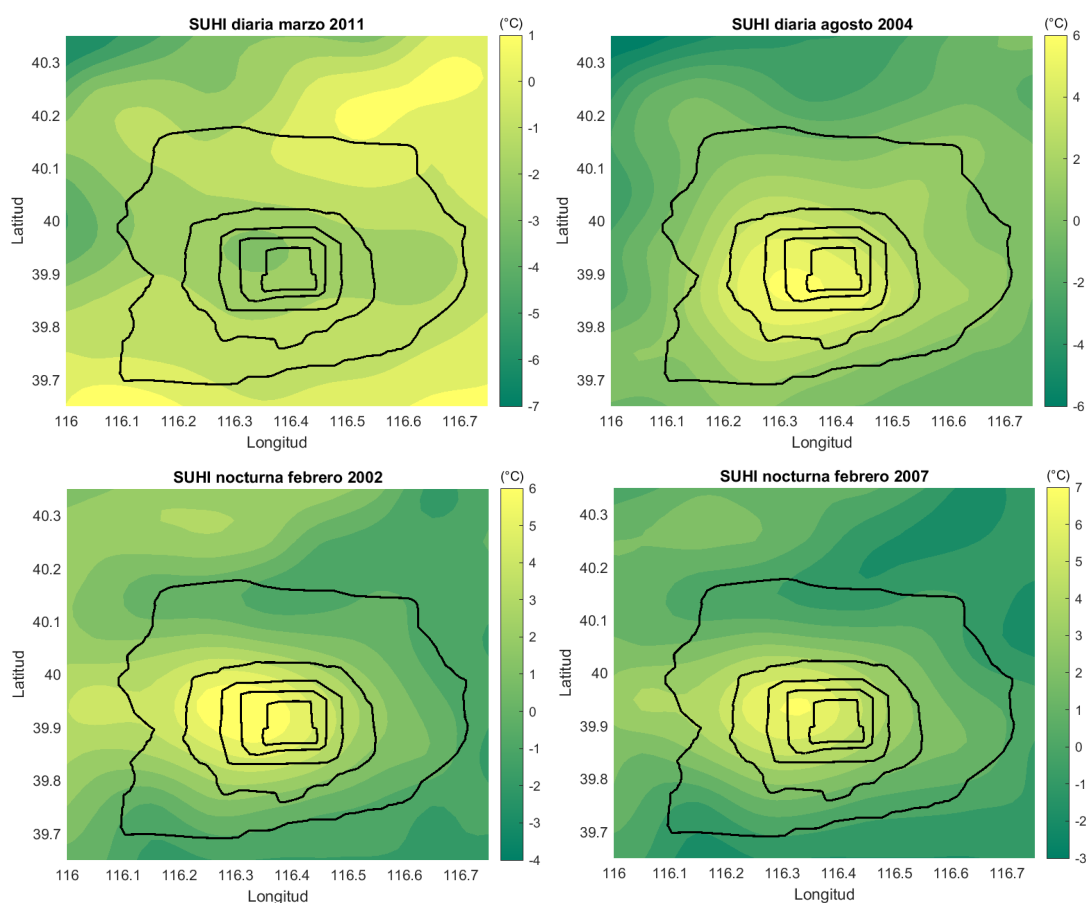


**Gráfico 8.** Evolución de la intensidad de la isla urbana de calor superficial nocturna.

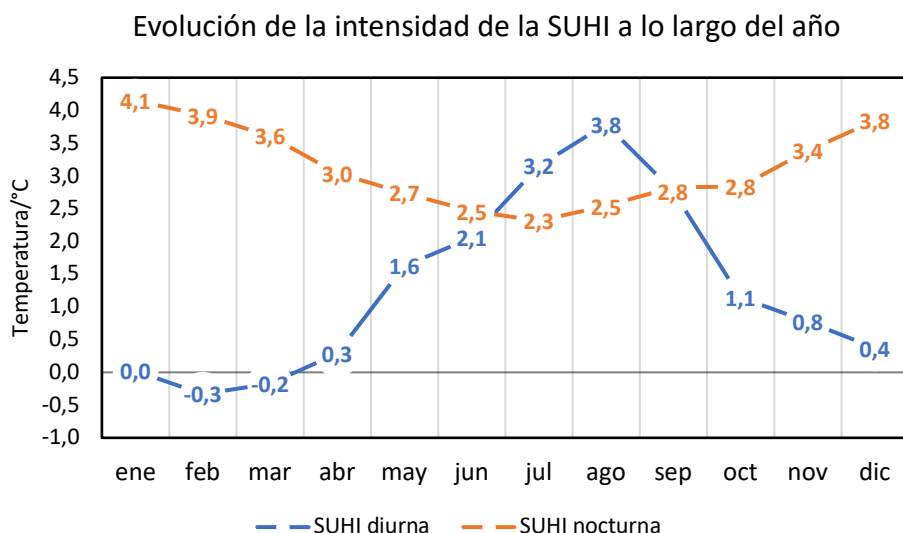
Por otro lado, cabe destacar la gran amplitud en las oscilaciones anuales de la SUHI diurna. Parte de la curva toma valores negativos, lo que significa que las temperaturas rurales son más altas que las urbanas. Esto suele suceder en los primeros meses del año, desde enero hasta abril. Sin embargo, en el año 2009, las temperaturas medias urbanas siempre fueron superiores a las rurales. Incluso desde el 2018, la intensidad de la SUHI se ha mantenido prácticamente en valores positivos. Por último, en marzo de 2011, las temperaturas diurnas rurales llegaron a superar a las urbanas en 1,5 °C de media.

En cuanto al **Gráfico 8**, la intensidad de la SUHI nocturna nunca toma valores negativos y oscila en torno a los 3,0 °C (SUHI media anual). Los máximos principales se dan en los meses de enero y de febrero, llegando a valores de la SUHI tan altos como 5,1 °C en 2002 y 5,2 °C en 2007. Los valores más bajos suelen darse en los meses de verano. Estos mínimos oscilan alrededor de los 2,0 °C. Solo en julio de 2018 la diferencia entre la temperatura urbana y la rural fue de menos de 1,0 °C.

En la **Figura 12**, se muestran algunos de los ejemplos de la distribución espacial de la intensidad de la SUHI antes mencionados.



**Figura 12.** Ejemplos de la distribución espacial de la intensidad de la SUHI. Durante el día, en marzo de 2011 las temperaturas urbanas fueron menores que las rurales. En los meses de verano, la intensidad de la SUHI llega hasta los 6,0 °C, como en agosto de 2004. Durante la noche, la SUHI es especialmente intensa en los meses de febrero. En la figura se muestran los años 2002 y 2007, cuando la diferencia de temperaturas entre la ciudad y el campo fue realmente destacada. Coordenadas en grados.

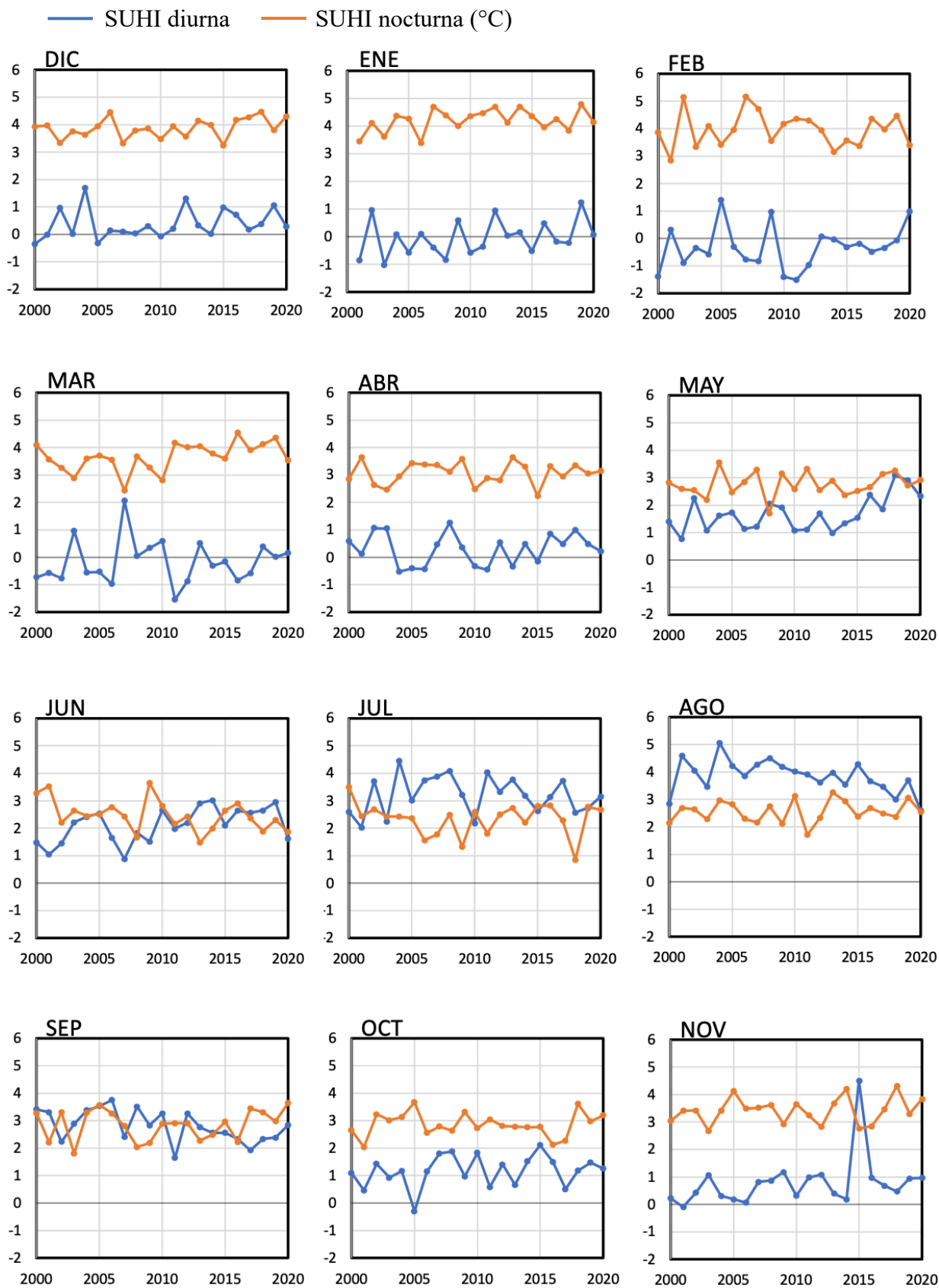


**Gráfico 9.** Evolución de la intensidad de la isla urbana de calor superficial media diurna y nocturna a lo largo del año.

En el **Gráfico 9**, se representa la evolución de la intensidad media de la SUHI a lo largo del año. La amplitud de la oscilación anual de la SUHI diurna es mayor que en la SUHI nocturna. De nuevo, podemos observar que la SUHI diurna más intensa tiene lugar en el mes de agosto (3,8 °C), y la nocturna, en el mes de enero (4,1 °C). Los valores diurnos más bajos tienen lugar en los meses de febrero (-0,3 °C) y marzo (-0,2 °C), cuando las temperaturas rurales llegan a ser más altas que las urbanas; los valores nocturnos más bajos se dan en los meses de verano y, en particular, en julio (2,3 °C). De hecho, cuando la intensidad de la SUHI diurna es máxima, la nocturna es mínima, y viceversa. Un estudio<sup>100</sup> basado en las observaciones de MODIS desde el año 2001 hasta el 2008 obtuvo resultados similares: durante el verano, la intensidad de la SUHI diurna fue de 3,6 °C; durante el invierno, la SUHI diurna fue de 0,1 °C y la nocturna de 3,4 °C. Otro estudio<sup>101</sup> realizado a partir de las observaciones de 185 estaciones meteorológicas fijas durante el periodo 2007–2010 revela que la intensidad de la isla de calor atmosférica es mayor en invierno y débil en primavera y verano.

En el **Gráfico 10**, se muestran las evoluciones de las SUHIs diurna y nocturna según el mes desde el año 2000. Se puede observar que la SUHI nocturna siempre es más intensa que la diurna salvo en los meses más calurosos del año: junio, julio, agosto y septiembre. La mayor diferencia entre las intensidades de la SUHI diurna y nocturna tiene lugar en los meses de enero y febrero. Asimismo, volvemos a observar ese valor atípico de la SUHI diurna en noviembre de 2015.

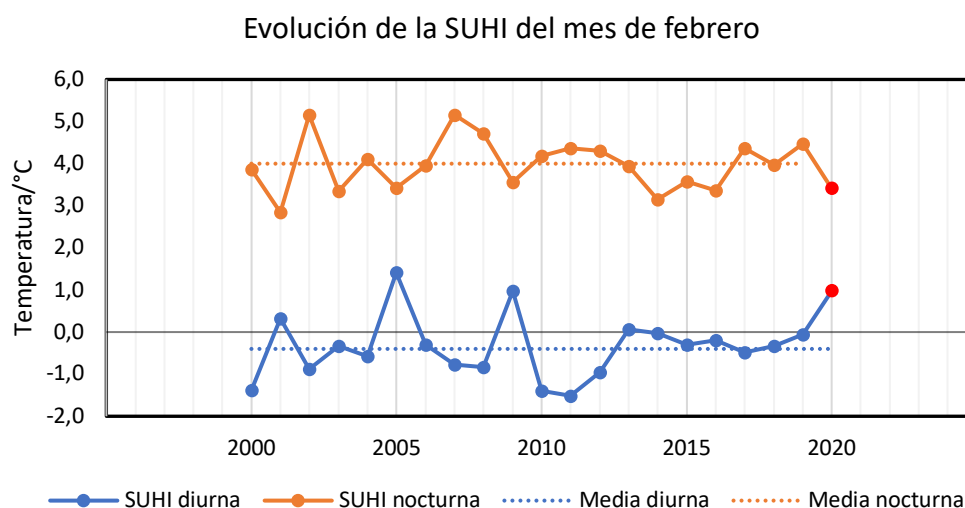
Por último, merecen especial atención los primeros meses del año 2020 por las restricciones de movilidad impuestas en la ciudad de Pekín para controlar la transmisión del SARS-CoV-2. Los primeros casos de contagio en la capital se registraron a mediados del mes de enero, y no fue hasta finales de este mes cuando comenzaron las restricciones sanitarias. A pesar de que el confinamiento en Pekín no fue tan estricto como el vivido en la ciudad donde se detectaron los primeros casos de la enfermedad, Wuhan, los habitantes de Pekín se encerraron en sus casas, reduciéndose drásticamente el tráfico en el centro de la ciudad. Tantas limitaciones en la movilidad pueden llegar a modificar la intensidad en la isla urbana de calor. La intensidad de la SUHI diurna del mes de febrero de 2020 es 1,4 °C más alta que la media de otros años, mientras la intensidad de la SUHI nocturna es 0,6 °C menor (**Tabla 9**). En el **Gráfico 11**, se representa la evolución de la SUHI en el mes de febrero desde el año 2000 hasta el 2020.



**Gráfico 10.** Evolución de la SUHI, diurna y nocturna, por meses desde el año 2000 hasta el 2020.

FEBRERO (°C)		Día		Noche	
		Media	Desviación	Media	Desviación
$T_{urb}/T_{rural}$	Otros años	7,2/7,5	0,5/0,7	-3,3/-7,3	1,0/1,0
	2020	6,1/5,2	–	-1,4/-4,8	–
SUHI	Otros años	-0,4	0,7	4	0,6
	2020	1,0	–	3,4	–

**Tabla 9.** Intensidad de la SUHI de los meses de febrero del 2020 y del resto de años (2000–2019).



**Gráfico 11.** Evolución de la SUHI diurna y nocturna en los meses de febrero desde el año 2000 hasta el 2020 (marcado en rojo).

### Tendencia de las temperaturas

La **Tabla 10** muestra los resultados obtenidos tras el ajuste de regresión lineal múltiple descrito en la sección **2.2.2**. La tendencia de las temperaturas medias es creciente, especialmente durante la noche. El aumento de temperaturas es mayor en las zonas suburbanas, tanto de día como de noche, con 0,5 y 0,8 °C/década respectivamente. Hu et al. (2017)<sup>102</sup> estimaron un crecimiento anual de 0,3–0,4 °C por década debido a la urbanización a partir de los datos recogidos por 20 estaciones meteorológicas durante el periodo 1983–2011. La amplitud de las oscilaciones térmicas también crece, más durante la noche que durante el día, aunque no lo hace en ninguna zona en particular.

Por último, se comprueba que la correlación significativa entre la temperatura media y el tiempo. En la **Tabla 11**, se muestran los p-valores obtenidos en cada ajuste múltiple, según las pruebas de 1 cola o de 2 colas. Todos son nulos, por lo que serán menores que cualquier nivel de significación propuesto. Además, los coeficientes de correlación obtenidos son muy superiores a los valores críticos de la **Tabla 2**. Podemos concluir que el ajuste realizado ha resultado satisfactorio.

TENDENCIA TEMPERATURAS	Día			Noche		
	Urbano	Suburbano	Rural	Urbano	Suburbano	Rural
A <sub>0</sub> (°C)	20,9	20,2	19,7	9,3	7,5	6,2
B <sub>0</sub> (°C/déc)	0,3	0,5	0,2	0,7	0,8	0,6
C <sub>0</sub> (°C)	17,4	16,7	15,7	15,3	15,8	16,0
D <sub>0</sub> (°C/déc)	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
r	0,984	0,981	0,976	0,990	0,991	0,992

**Tabla 10.** Tendencia de la temperatura mediante modelo armónico y coeficiente de correlación de Pearson del ajuste. Los coeficientes han sido hallados a partir del ajuste múltiple descrito en la sección 2.2.2. Los coeficientes B<sub>0</sub> y D<sub>0</sub> han sido multiplicados por 120, por lo que dan cuenta del crecimiento de la temperatura por década (120 meses).

P-VALOR	Día			Noche		
	Urbano	Suburbano	Rural	Urbano	Suburbano	Rural
1 cola	7E-190	2E-180	2E-167	1E-215	2E-223	5E-228
2 colas	1E-189	5E-180	4E-167	2E-215	4E-223	1E-227

**Tabla 11.** P-valor a una y dos colas en el ajuste de regresión lineal múltiple de las temperaturas urbana, suburbana y rural.

### Tendencia de la SUHI

La intensidad de la SUHI también se ajusta al modelo armónico descrito en la sección 2.2.2. La **Tabla 12** muestra los coeficientes obtenidos tras el ajuste de regresión lineal múltiple de los **Gráficos 7 y 8**, además del coeficiente de correlación de Pearson. Tanto el coeficiente de correlación como los p-valores de la **Tabla 13** confirman la bondad del ajuste. El crecimiento de la intensidad de la SUHI diurna es más del doble que el de la SUHI nocturna: 0,14 °C frente a 0,06 °C en el periodo de una década, respectivamente. Además, la amplitud de ambas SUHIs también tiene una tendencia ascendente: se espera que dentro de 10 años la amplitud de la oscilación anual de la intensidad de la SUHI diurna haya crecido 0,2 °C, y la de la nocturna, 0,1 °C.

TENDENCIA SUHI	Día	Noche
A <sub>0</sub> (°C)	1,2	3,1
B <sub>0</sub> (°C/déc)	0,14	0,06
C <sub>0</sub> (°C)	2,0	0,7
D <sub>0</sub> (°C/déc)	0,2	0,1
r	0,863	0,776

**Tabla 12.** Tendencia de la intensidad de la SUHI mediante modelo armónico y coeficiente de correlación de Pearson ajuste. De nuevo, los coeficientes B<sub>0</sub> y D<sub>0</sub> han sido multiplicados por 120 (número de meses en un periodo de 10 años), por lo que indican la variación de la intensidad de la SUHI por década.

P-VALOR	Día	Noche
1 cola	1,7E-76	2,7E-52
2 colas	3,4E-76	5,4E-52

**Tabla 13.** P-valor a una y dos colas en el ajuste de regresión lineal múltiple de la intensidad de la SUHI.

---

# 4. Conclusiones



A lo largo de este trabajo, se han calculado las temperaturas medias, máximas y mínimas, mensuales y estacionales, de las zonas urbanas y rurales de la ciudad de Pekín a partir de las observaciones de MODIS. Además, se han ido mostrando los resultados más destacados en lo relativo a la distribución espacial y a la evolución temporal de la isla urbana de calor superficial.

Las SUHI más intensas tienen lugar durante los días de verano ( $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y durante las noches de invierno ( $4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Las SUHI más débiles ocurren durante las noches invernales ( $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Además, la intensidad de la SUHI diurna varía notablemente a lo largo del año: llega a ser negativa en los meses de febrero ( $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y marzo ( $-0,2\text{ }^{\circ}$ ) y alcanza la máxima intensidad en agosto ( $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). La SUHI nocturna realiza oscilaciones anuales más suaves: la intensidad es máxima en el mes de enero ( $4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y es mínima en el mes de julio ( $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

También hemos visto que las temperaturas mantienen una tendencia en ascenso, especialmente durante la noche:  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$  en las zonas urbanas,  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$  en las zonas suburbanas y  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$  en las zonas rurales. Durante el día, el crecimiento es más acusado en los suburbios de la ciudad con  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ , mientras que en el centro y en el campo las temperaturas crecen a un ritmo menor:  $0,3$  y  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ , respectivamente.

Los mapas muestran que la SUHI tiene lugar principalmente en la parte oeste de la ciudad. Además, el hecho de que las temperaturas suburbanas crezcan a un ritmo mayor que las urbanas y las rurales hace indicar que la SUHI se está extendiendo espacialmente con el tiempo, junto con la expansión de la ciudad de Pekín.

Asimismo, la intensidad de la SUHI se acentúa con el tiempo: la SUHI diurna ( $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ ) crece al doble de ritmo que la SUHI nocturna ( $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ ). Igualmente, el crecimiento de la amplitud de la oscilación anual de la intensidad de la SUHI también es mayor en el caso diurno que en el nocturno:  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$  frente a  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ , respectivamente.

Si bien este calor adicional en la ciudad puede ser beneficioso en invierno, disminuyendo los costes en las calefacciones de los hogares, mejorando el confort de los habitantes o reduciendo el riesgo de heladas en las carreteras, puede llegar a ser perjudicial en verano, aumentando el riesgo en la población de sufrir un golpe de calor e incrementando el coste del aire acondicionado y la demanda de energía.

Este trabajo abre paso a nuevos estudios que relacionen las temperaturas superficiales obtenidas a partir de observaciones satelitales con las mediciones de estaciones meteorológicas fijas. De esta manera, se podría mejorar la precisión espacial y temporal de las medidas, relacionar la isla urbana de calor superficial con la atmosférica y encontrar soluciones específicas que ayuden a mitigar el exceso de calor acumulado en las zonas urbanas mediante la creación o ampliación de zonas verdes o un control más restrictivo de la expansión de las ciudades.

---

# 5. Bibliografía

1. Balchin WG V, Pye N. A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Q J R Meteorol Soc.* 1947;73(317-318):297-323. doi:10.1002/qj.49707331706
2. Huang Q, Lu Y. Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis. *Theor Appl Climatol.* 2018;131(3-4):1055-1067. doi:10.1007/s00704-016-2025-1
3. Stewart ID, Oke TR. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull Am Meteorol Soc.* 2012;93(12):1879-1900. doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1
4. ONU DAES. Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. Naciones Unidas Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. Accedido junio 3, 2021. <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
5. Masson V, Lemonsu A, Hidalgo J, Voogt J. Urban climates and climate change. *Annu Rev Environ Resour.* 2020;45:411-444. doi:10.1146/annurev-environ-012320-083623
6. Liu J, Niyogi D. Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Sci Rep.* 2019;9(1):1-14. doi:10.1038/s41598-019-42494-2
7. Theeuwes NE, Barlow JF, Teuling AJ, Grimmond CSB, Kotthaus S. Persistent cloud cover over mega-cities linked to surface heat release. *npj Clim Atmos Sci.* 2019;2(1). doi:10.1038/s41612-019-0072-x
8. Varentsov M, Wouters H, Platonov V, Konstantinov P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia. *Atmosphere (Basel).* 2018;9(2). doi:10.3390/atmos9020050
9. Manoli G, Fatichi S, Schlöpfer M, et al. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature.* 2019;573(7772):55-60. doi:10.1038/s41586-019-1512-9
10. Izquierdo R, García Dos Santos S, Borge R, et al. Health impact assessment by the implementation of Madrid City air-quality plan in 2020. *Environ Res.* 2020;183(July 2019):109021. doi:10.1016/j.envres.2019.109021
11. Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA. *Urban Climates.* Cambridge University Press; 2017. doi:10.1017/9781139016476
12. Klysiak K. Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emissions in Lodz, Poland. *Atmos Environ.* 1996;30(20):3397-3404. doi:10.1016/1352-2310(96)00043-X
13. Wang Y, Li Y, Di Sabatino S, Martilli A, Chan PW. Effects of anthropogenic heat due to air-conditioning systems on an extreme high temperature event in Hong Kong. *Environ Res Lett.* 2018;13(3). doi:10.1088/1748-9326/aaa848
14. Pandey P, Kumar D, Prakash A, et al. A study of urban heat island and its association with particulate matter during winter months over Delhi. *Sci Total Environ.* 2012;414:494-507. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.10.043
15. Muller CL, Chapman L, Grimmond CSB, Young DT, Cai X. Sensors and the city: A review of urban meteorological networks. *Int J Climatol.* 2013;33(7):1585-1600. doi:10.1002/joc.3678
16. Maral SG, Mukhopadhyay T. Signal of urban heat island (UHI) effect: A case study of Mumbai metropolitan region. *Mausam.* 2015;66(4):729-740.
17. Ketterer C, Matzarakis A. Human-biometeorological assessment of the urban heat island in a city with complex topography – The case of Stuttgart, Germany. *Urban Clim.* 2014;10:573-584. doi:10.1016/j.uclim.2014.01.003
18. Hamagami T, Tanaka H, Ichinose T. Preliminary study of the vertical structure of mountain wind in nagano city, central Japan. *Geogr Reports Tokyo Metrop Univ.* 2008;43(January 2008):91-98.
19. Oke TR. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands. *Atmosphere (Basel).* 1976;14(4):268-277. doi:10.1080/00046973.1976.9648422
20. Voogt JA, Oke TR. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens Environ.* 2003;86(3):370-384. doi:10.1016/S0034-4257(03)00079-8
21. Smoliak B V., Snyder PK, Twine TE, Mykleby PM, Hertel WF. Dense Network Observations of the Twin Cities Canopy-Layer Urban Heat Island. *J Appl Meteorol Climatol.* 2015;54(9):1899-1917. doi:10.1175/JAMC-D-14-0239.1
22. Jin M, Dickinson RE. Land surface skin temperature climatology: Benefitting from the strengths of satellite observations. *Environ Res Lett.* 2010;5(4). doi:10.1088/1748-9326/5/4/044004
23. Wang K, Jiang S, Wang J, Zhou C, Wang X, Lee X. Comparing the diurnal and seasonal variabilities of atmospheric and surface urban heat islands based on the Beijing urban meteorological network. *J Geophys Res.* 2017;122(4):2131-2154. doi:10.1002/2016JD025304
24. Zhou D, Xiao J, Bonafoni S, et al. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. *Remote Sens.* 2019;11(1):1-36. doi:10.3390/rs11010048
25. Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 2009;64(4):335-344.

- doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007
26. Deilami K, Kamruzzaman M, Liu Y. Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*. 2018;67:30-42. doi:10.1016/j.jag.2017.12.009
  27. Ho HC, Knudby A, Sirovyak P, Xu Y, Hodul M, Henderson SB. Mapping maximum urban air temperature on hot summer days. *Remote Sens Environ*. 2014;154(May 2018):38-45. doi:10.1016/j.rse.2014.08.012
  28. Pichierrri M, Bonafoni S, Biondi R. Satellite air temperature estimation for monitoring the canopy layer heat island of Milan. *Remote Sens Environ*. 2012;127:130-138. doi:10.1016/j.rse.2012.08.025
  29. Anniballe R, Bonafoni S, Pichierrri M. Spatial and temporal trends of the surface and air heat island over Milan using MODIS data. *Remote Sens Environ*. 2014;150:163-171. doi:10.1016/j.rse.2014.05.005
  30. Roth M, Oke TR, Emery WJ. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *Int J Remote Sens*. 1989;10(11):1699-1720. doi:10.1080/01431168908904002
  31. Bonafoni S, Baldinelli G, Verducci P, Presciutti A. Remote sensing techniques for urban heating analysis: A case study of sustainable construction at district level. *Sustain*. 2017;9(8). doi:10.3390/su9081308
  32. Sobrino JA, Oltra-Carrió R, Sòria G, et al. Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing. *Int J Remote Sens*. 2013;34(9-10):3177-3192. doi:10.1080/01431161.2012.716548
  33. Masson V, Heldens W, Bocher E, et al. City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges. *Urban Clim*. 2020;31(December 2018):100536. doi:10.1016/j.uclim.2019.100536
  34. Maronga B, Banzhaf S, Burmeister C, et al. *Overview of the PALM model system 6.0*. Vol 13.; 2020. doi:10.5194/gmd-13-1335-2020
  35. Resler J, Krč P, Belda M, et al. PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model. *Geosci Model Dev*. 2017;10(10):3635-3659. doi:10.5194/gmd-10-3635-2017
  36. Houet T, Pigeon G. Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors - An application on Toulouse urban area (France). *Environ Pollut*. 2011;159(8-9):2180-2192. doi:10.1016/j.envpol.2010.12.027
  37. Leconte F, Bouyer J, Claverie R, Pétrissans M. Analysis of nocturnal air temperature in districts using mobile measurements and a cooling indicator. *Theor Appl Climatol*. 2017;130(1-2):365-376. doi:10.1007/s00704-016-1886-7
  38. Taesler R. Studies of the development and thermal structure of the urban boundary layer in Uppsala. 1980;(May):221. doi:10.13140/RG.2.1.2975.5766
  39. Ching J, Mills G, Bechtel B, et al. WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene. *Bull Am Meteorol Soc*. 2018;99(9):1907-1924. doi:10.1175/BAMS-D-16-0236.1
  40. Bechtel B, Alexander PJ, Böhner J, et al. Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS Int J Geo-Information*. 2015;4(1):199-219. doi:10.3390/ijgi4010199
  41. Zheng Y, Ren C, Xu Y, et al. GIS-based mapping of Local Climate Zone in the high-density city of Hong Kong. *Urban Clim*. 2018;24(June):419-448. doi:10.1016/j.uclim.2017.05.008
  42. Gong FY, Zeng ZC, Zhang F, Li X, Ng E, Norford LK. Mapping sky, tree, and building view factors of street canyons in a high-density urban environment. *Build Environ*. 2018;134(December 2017):155-167. doi:10.1016/j.buildenv.2018.02.042
  43. Reinartz P, Angelo P, Krauß T, Poli D, Jacobsen K, Buyuksalih G. Benchmarking and quality analysis of dem generated from high and very high resolution optical stereo satellite data. *ISPRS Symp Comm I*. 2010;(June):1-6.
  44. Eckert S, Hollands T. Comparison of Automatic DSM Generation Modules by Processing IKONOS Stereo Data of an Urban Area. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*. 2010;3(2):162-167. doi:10.1109/JSTARS.2010.2047096
  45. Marchi N, Pirotti F, Lingua E. Airborne and Terrestrial Laser Scanning Data for the Assessment of Standing and Lying Deadwood: Current Situation and New Perspectives. *Remote Sens*. 2018;10(9):1356. doi:10.3390/rs10091356
  46. Over M, Schilling A, Neubauer S, Zipf A. Generating web-based 3D City Models from OpenStreetMap: The current situation in Germany. *Comput Environ Urban Syst*. 2010;34(6):496-507. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2010.05.001

47. Santamouris M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol Energy*. 2014;103:682-703. doi:10.1016/j.solener.2012.07.003
48. Jackson TL, Feddema JJ, Oleson KW, Bonan GB, Bauer JT. *Parameterization of urban characteristics for global climate modeling*. Vol 100.; 2010. doi:10.1080/00045608.2010.497328
49. Burochin JP, Tournaire O, Paparoditis N. an Unsupervised Hierarchical Segmentation of a Fac Ade Building Image in Elementary 2D-Models. *ISPRS Work Object Extr 3D City Model Road Databases Traffic Monit Algorithms Eval (CMRT '09)*. 2009;38(July):223–228. [http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.177.2210&rep=rep1&type=pdf%5Cnhtp://recherche.ign.fr/labos/matis/pdf/articles\\_conf/2009/jpb\\_cmrt09.pdf](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.177.2210&rep=rep1&type=pdf%5Cnhtp://recherche.ign.fr/labos/matis/pdf/articles_conf/2009/jpb_cmrt09.pdf)
50. Ching J, Aliaga D, Mills G, et al. Pathway using WUDAPT's Digital Synthetic City tool towards generating urban canopy parameters for multi-scale urban atmospheric modeling. *Urban Clim*. 2019;28:100459. doi:10.1016/j.uclim.2019.100459
51. Lu Y, Coops NC, Hermosilla T. Estimating urban vegetation fraction across 25 cities in pan-Pacific using Landsat time series data. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*. 2017;126:11-23. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.12.014
52. Khalifa A, Marchetti M, Bouilloud L, Martin E, Bues M, Chancibaut K. Accounting for anthropic energy flux of traffic in winter urban road surface temperature simulations with the TEB model. *Geosci Model Dev*. 2016;9(2):547-565. doi:10.5194/gmd-9-547-2016
53. Schoetter R, Masson V, Bourgeois A, Pellegrino M, Lévy JP. Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in the Town Energy Balance (SURFEX-TEB v. 8.2). *Geosci Model Dev*. 2017;10(7):2801-2831. doi:10.5194/gmd-10-2801-2017
54. Allen L, Lindberg F, Grimmond CSB. Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. *Int J Climatol*. 2011;31(13):1990-2005. doi:10.1002/joc.2210
55. Dong Y, Varquez ACG, Kanda M. Global anthropogenic heat flux database with high spatial resolution. *Atmos Environ*. 2017;150:276-294 doi:10.1016/j.atmosenv.2016.11.040
56. Heiple S, Sailor DJ. Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles. *Energy Build*. 2008;40(8):1426-1436. doi:10.1016/j.enbuild.2008.01.005
57. Fonte CC, Minghini M, Antoniou V, Patriarca J, See L. Classification of building function using available sources of VGI. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci - ISPRS Arch*. 2018;42(4):283-290. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-209-2018
58. Kunze C, Hecht R. Semantic enrichment of building data with volunteered geographic information to improve mappings of dwelling units and population. *Comput Environ Urban Syst*. 2015;53:4-18. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2015.04.002
59. Arsiso BK, Mengistu Tsidu G, Stoffberg GH. Signature of present and projected climate change at an urban scale: The case of Addis Ababa. *Phys Chem Earth*. 2018;105(March):104-114. doi:10.1016/j.pce.2018.03.008
60. Rome AS, Salvati L, Zambon I, et al. Case Report A Time-Series Analysis of Climate Variability in.
61. Lee K, Kim Y, Sung HC, Jang R, Ryu J, Jeon SW. Trend analysis of urban heat island intensity according to urban area change in Asian mega cities. *40th Asian Conf Remote Sensing, ACRS 2019; Progress Remote Sens Technol Smart Futur*. Published online 2020.
62. Fujibe F. Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring. *Int J Climatol*. 2011;31(2):162-173. doi:10.1002/joc.2142
63. Le Roy B, Lemonsu A, Kounkou-Arnaud R, Brion D, Masson V. Long time series spatialized data for urban climatological studies: A case study of Paris, France. *Int J Climatol*. 2020;40(7):3567-3584. doi:10.1002/joc.6414
64. Depietri Y, McPhearson T. Changing urban risk: 140 years of climatic hazards in New York City. *Clim Change*. 2018;148(1-2):95-108. doi:10.1007/s10584-018-2194-2
65. Rivera A, Bravo C, Buob G. *Climate Change and Land Ice*.; 2017. doi:10.1002/9781118786352.wbieg0538
66. Fenner D, Holtmann A, Krug A, Scherer D. Heat waves in Berlin and Potsdam, Germany – Long-term trends and comparison of heat wave definitions from 1893 to 2017. *Int J Climatol*. 2019;39(4):2422-2437. doi:10.1002/joc.5962
67. Daniel M, Lemonsu A, Déqué M, Somot S, Alias A, Masson V. Benefits of explicit urban parameterization in regional climate modeling to study climate and city interactions. *Clim Dyn*. 2019;52(5-6):2745-2764. doi:10.1007/s00382-018-4289-x
68. Oleson KW, Bonan GB, Feddema J, Jackson T. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *Int J Climatol*. 2011;31(12):1848-1865. doi:10.1002/joc.2201

69. Doan VQ, Kusaka H. Projections of urban climate in the 2050s in a fast-growing city in Southeast Asia: The greater Ho Chi Minh City metropolitan area, Vietnam. *Int J Climatol*. 2018;38(11):4155-4171. doi:10.1002/joc.5559
70. Chen L, Frauenfeld OW. Impacts of urbanization on future climate in China. *Clim Dyn*. 2016;47(1-2):345-357. doi:10.1007/s00382-015-2840-6
71. Kusaka H, Hara M, Takane Y. Urban Climate Projection by the WRF Model at 3-km Horizontal Grid Increment: Dynamical Downscaling and Predicting Heat Stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya Metropolises. *J Meteorol Soc Japan Ser II*. 2012;90B:47-63. doi:10.2151/jmsj.2012-B04
72. Kikumoto H, Ooka R, Arima Y. A study of urban thermal environment in Tokyo in summer of the 2030s under influence of global warming. *Energy Build*. 2016;114:54-61. doi:10.1016/j.enbuild.2015.07.033
73. Vigiú V, Lemonsu A, Hallegatte S, et al. Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris. *Environ Res Lett*. 2020;15(7):075006. doi:10.1088/1748-9326/ab6a24
74. Hou R. The City of Beijing in the History. *Beijing China's Youth Press* (侯仁之 历史上的北京城中国青年出版社). Published online 1962.
75. Johnson I. As Beijing Becomes a Supercity, the Rapid Growth Brings Pains - The New York Times. Published 2015. Accedido junio 21, 2021. <https://www.nytimes.com/2015/07/20/world/asia/in-china-a-supercity-rises-around-beijing.html>
76. Atlas of Urban Expansion - Beijing, Beijing. Accedido junio 4, 2021. [http://www.atlasofurbanexpansion.org/cities/view/Beijing\\_Beijing](http://www.atlasofurbanexpansion.org/cities/view/Beijing_Beijing)
77. Beijing Statistic Bureau. *The 6th Beijing census report, Beijing* (北京市统计局, 第六次人口统计公报); 2011.
78. Thomas N, Peter T. Migrants moved on as Beijing deals with building «disease» | Reuters. Published 2017. Accedido junio 21, 2021. <https://www.reuters.com/article/us-china-migrants/migrants-moved-on-as-beijing-deals-with-building-disease-idUSKBN1AR0QZ>
79. Chai Y, Shen Y. Los espacios de movilidad de las poblaciones suburbanas de Pekín. *Doc d'Anàlisi Geogràfica*. 2017;63(2):277. doi:10.5565/rev/dag.401
80. Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2007;11(5):1633-1644. doi:10.5194/hess-11-1633-2007
81. Country Profile:Beijing--People's Daily Online. Accedido junio 21, 2021. <http://en.people.cn/data/province/beijing.html>
82. Clima 海淀路社区: Temperatura, Climograma y Tabla climática para 海淀路社区 - Climate-Data.org. Accedido julio 6, 2021. <https://es.climate-data.org/asia/republica-popular-china/beijing/海淀路社区-980389/#climate-graph>
83. Gu C, Chan RCK, Liu J, Kesteloot C. Beijing's socio-spatial restructuring: Immigration and social transformation in the epoch of national economic reformation. *Prog Plann*. 2006;66(4):249-310. doi:10.1016/j.progress.2006.10.001
84. Shenghe L, Prieler S, Xiubin L. Spatial patterns of urban land use growth in Beijing. *J Geogr Sci*. 2002;12(3):266-274. doi:10.1007/BF02837544
85. Huang Y. Land Lines. *Rangelands*. 2015;37(6):233-236. doi:10.1016/j.rala.2015.10.008
86. Liu J. Suburban development from perspective of regional integration-what can Beijing learn from Paris facing the rapid urbanization. *Nanjing Dongnan Univ Press*. Published online 2004.
87. Wang D, Chai Y. The jobs-housing relationship and commuting in Beijing, China: the legacy of Danwei. *J Transp Geogr*. 2009;17(1):30-38. doi:10.1016/j.jtrangeo.2008.04.005
88. Zhao P. Managing urban growth in a transforming China: Evidence from Beijing. *Land use policy*. 2011;28(1):96-109. doi:10.1016/j.landusepol.2010.05.004
89. Beijing Municipal Planning Committee. 2006 Beijing Urban Planning Atlas (1949-2005). *Beijing Inst City Planning, Beijing Acad Urban Plan*. Published online 2006.
90. Long Y, Gu Y, Han H. Spatiotemporal heterogeneity of urban planning implementation effectiveness: Evidence from five urban master plans of Beijing. *Landsc Urban Plan*. 2012;108(2-4):103-111. doi:10.1016/j.landurbplan.2012.08.005
91. Mu Q, Miao S, Wang Y, Li Y, He X, Yan C. Evaluation of employing local climate zone classification for mesoscale modelling over Beijing metropolitan area. *Meteorol Atmos Phys*. 2020;132(3):315-326. doi:10.1007/s00703-019-00692-7
92. MODIS Web. Accedido junio 21, 2021. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>
93. Wan Z, S. Hook, G. Hulley. MOD11C1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 0.05Deg CMG V006. *NASA EOSDIS L Process DAAC*. Published online 2015. doi:<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11C1.006>.

94. MODIS Web. Accedido junio 21, 2021. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>
95. Duan S-B, Li Z-L, Li H, et al. Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements. *Remote Sens Environ.* 2019;225:16-29. doi:10.1016/j.rse.2019.02.020
96. Wan Z. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment.* 2014;140:36-45. doi:10.1016/j.rse.2013.08.027
97. Yonghong I, Xongming X, Jingjin M, Weijun Q. Quantitative assessment and planning simulation of Beijing urban heat island. *Ecol Environ Sci*, 23(7). Published online 2014. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2014.07.010
98. Sun H, Chen Y, Zhan W. Comparing surface- and canopy-layer urban heat islands over Beijing using MODIS data. *International Journal of Remote Sensing.* 2015;36(21):5448-5465. doi:10.1080/01431161.2015.1101504
99. Vidal R, Ma Y, Sastry SS. *Statistical methods.* Vol 40.; 2016. doi:10.1007/978-0-387-87811-9\_6
100. Zhou J. Modeling the monthly variations of urban heat island in Beijing City with MODIS surface products. *Int Conf Remote Sensing, Environment Transp Eng (RSETE 2013)*. Published online 2013.
101. Yang P, Ren G, Liu W. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity. *J Appl Meteorol Climatol.* 2013;52(8):1803-1816. doi:10.1175/JAMC-D-12-0125.1
102. Hu X, Zhou W, Qian Y, Yu W. Urban expansion and local land-cover change both significantly contribute to urban warming, but their relative importance changes over time. *Landsc Ecol.* 2017;32(4):763-780. doi:10.1007/s10980-016-0484-5

---

## 6. Figuras, tablas y gráficos



## FIGURAS

Figura 1. Principales procesos que intervienen en la formación de la UHI.....	3
Figura 2. Escalas de interacción de los procesos meteorológicos urbanos.....	5
Figura 3. Comparación entre la temperatura atmosférica y la superficial de una estación meteorológica fija en la ciudad de Madrid en 2008 .....	6
Figura 4. Extensión de la superficie urbana en los años 1988, 1999 y 2013.....	13
Figura 5. Plan urbanístico actual de Pekín.....	16
Figura 6. Distribución de las zonas climáticas locales (LCZ) en Pekín.....	17
Figura 7. Ejemplos de diferentes LCZ en Pekín.....	18
Figura 8. Coordenadas de los puntos en los que MODIS mide la temperatura....	22
Figura 9. Distribución espacial de las temperaturas medias anual y estacional...	28
Figura 10. Distribución espacial de temperaturas medias de algunos meses del año 2011: enero, febrero, mayo y agosto.....	32
Figura 11. Distribución espacial de temperaturas máxima y mínima anual y por estaciones.....	35
Figura 12. Ejemplos de la distribución espacial de la intensidad de la SUHI.....	39

## TABLAS

Tabla 1. Clasificación propuesta de las zonas climáticas locales (LCZ) .....	9
Tabla 2. Coeficientes críticos de correlación de Pearson para los niveles de significación 0,1%, 1% y 5%.....	25
Tabla 3. Temperaturas medias rural y urbana e intensidad de la SUHI en primavera, verano, otoño, invierno y anual.....	28
Tabla 4. Temperaturas medias urbana y rural e intensidad de la SUHI durante los meses del año.....	30
Tabla 5. Temperaturas máximas urbana y rural y su diferencia en primavera, verano, otoño, invierno y anual.....	33
Tabla 6. Temperaturas mínimas urbana y rural registradas y su diferencia en primavera, verano, otoño, invierno y anual.....	33
Tabla 7. Temperaturas máximas y mínimas urbana y rural y su diferencia según el mes del año.....	33
Tabla 8. Estadísticos según la estación del año.....	36
Tabla 9. Intensidad de la SUHI de los meses de febrero del 2020 y del resto de años (2000–2019).....	42
Tabla 10. Tendencia de la temperatura mediante modelo armónico.....	43
Tabla 11. P-valor a una y dos colas en el ajuste de regresión lineal múltiple de las temperaturas.....	43
Tabla 12. Tendencia de la intensidad de la SUHI mediante modelo armónico....	43
Tabla 13. P-valor a una y dos colas en el ajuste de regresión lineal múltiple de la intensidad de la SUHI.....	43

## GRÁFICOS

Gráfico 1. Población en millones de habitantes de la ciudad de Pekín desde el año 1990 hasta el 2020.....	12
Gráfico 2. Temperatura media (máxima y mínima), precipitación total, humedad relativa y horas de sol durante los meses del año.....	14
Gráfico 3. Diagramas de cajas de las temperaturas superficiales urbana y rural (diurna y nocturna).....	29
Gráfico 4. Diagramas de cajas de las temperaturas superficiales urbana y rural (diurna y nocturna) por estaciones.....	30
Gráfico 5. Evolución de la temperatura superficial urbana y rural durante el día.....	37
Gráfico 6. Evolución de la temperatura superficial urbana y rural durante la noche.....	37
Gráfico 7. Evolución de la intensidad de la isla urbana de calor superficial diurna.....	38
Gráfico 8. Evolución de la intensidad de la isla urbana de calor superficial nocturna.....	38
Gráfico 9. Evolución de la intensidad de la isla urbana de calor superficial media diurna y nocturna a lo largo del año.....	40
Gráfico 10. Evolución de la SUHI, diurna y nocturna, por meses desde el año 2000 hasta el 2020.....	41
Gráfico 11. Evolución de la SUHI diurna y nocturna en los meses de febrero desde el año 2000 hasta el 2020.....	42